

VINICIUS GOMES DE CASTRO

ESPÉCIES DA AMAZÔNIA NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS MADEIRA-
CIMENTO POR VIBRO-COMPACTAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

Co-orientador: Prod. Dr. Carlos Frederico Alice Parchen

CURITIBA
2015

Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR
Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR

Castro, Vinicius Gomes de

Espécies da Amazônia na produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação / Vinicius Gomes de Castro. – 2015
221 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Setsuo Iwakiri

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Frederico Alice Parchen

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 23/02/2015.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais

1. Madeira - Testes. 2. Cimento Portland. 3. Indústria de construção civil. 4. Teses. I. Iwakiri, Setsuo. II. Parchen, Carlos Frederico Alice. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.833

PARECER

Defesa nº. 1081

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir o(a) doutorando(a) *Vinicius Gomes de Castro* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**ESPÉCIES DA AMAZÔNIA NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO POR VIBRO-COMPACTAÇÃO**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.

Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Primeiro examinador

Dr. Adalberto Matoski
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Segundo examinador

Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos
Universidade Federal do Paraná
Terceiro examinador

Dr. Carlos Frederico Alice Parchen
Universidade Federal do Paraná
Quarto examinador

Dr. Setsuo Iwakiri
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 23 de fevereiro de 2015.

Antonio Carlos Batista
Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, pela formação de qualidade que me proporcionou durante os quatro anos de doutorado.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro sem o qual este trabalho seria muito mais difícil, se não impossível, de ser realizado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA) através do projeto INCT-Madeiras da Amazônia, por disponibilizar o material para a realização desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Setsuo Iwakiri, pela orientação sempre paciente e justa.

Ao Professor Dr. Carlos Frederico Alice Parchen, pela sua co-orientação e amizade. É uma honra poder ter dado continuidade aos estudos iniciados em sua inspiradora tese sobre produção de painéis madeira-cimento pelo método de adensamento por vibro-compactação.

Ao Prof. Dr. Guilherme Sasaki e toda sua equipe do Laboratório de Bioquímica pelas análises e conhecimentos diretamente responsáveis pelas informações reveladores sobre a composição química das madeiras utilizadas nesta pesquisa.

Aos demais professores da área de tecnologia da madeira, pelos conselhos, sugestões e ideias que só vieram a agregar qualidades no desenvolvimento do trabalho e da minha vida pessoal. Dentre estes professores, não poderia deixar de citar o Dr. Jorge Luís Monteiro de Matos, Dr. Alan Sulato de Andrade, Dr. Márcio Pereira da Rocha, Dr. José Guilherme Prata, Dr. Ricardo Jorge Klitzke e, em especial, a Dra. Rosilani Trianoski.

Aos colegas da pós, pelo apoio moral e conversas descontraídas que, em momentos de estresse, foram tão fundamentais para o sucesso do trabalho quanto a ajuda física que eles nunca negaram. Segue uma lista meramente exemplificativa destes queridos amigos: Rafael Braz, Rafael Azambuja, Bárbara Villas Bôas, Narciso Bila e Roberto Daniel.

Aos técnicos e laboratoristas Sr. Ademir Cavalli, Sr. Vitor Herreira, Srta. Mariuci Santos, Srta. Gisele Brochini, Sra. Eliane Silva, Sra. Dioneia Romero, que são as eficientes mãos por trás da magia de todos os trabalhos realizado nos laboratórios de tecnologia da madeira da UFPR.

Aos doutores que durante toda minha vida me inspiraram a perseguir tal título: Dr. Stephen Strange, Dr. Otto Octavius, Dr. Robert Bruce Banner, Dr. Henry McCoy, Dr. Curtis Connors, Dr. Reed Richards e Dr. Victor von Doom.

E por último, as pessoas mais importantes de minha vida:

À minha família, meus pais Ronaldo e Alice Castro, pelo apoio e carinho incondicional; meu irmão Gregory Castro e meus sobrinhos João e Ricardo; e a minha avó Maria Gomes, que ainda vive em meu coração.

E à minha namorada Ana Paula Mikos, que me aguentou nos dias mais insuportáveis, nas glicemias mais elevadas e nas noites mais insones com paciência e amor.

Não elimine os problemas. Porque para lidar com eles, você inventa coisas. Lidar com problemas é o que faz seu trabalho ser o que é.

Will Eisner

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação da viabilidade e parâmetros de produção pelo método de adensamento por vibro-compactação de compósitos madeira-cimento produzidos a partir da mistura de cimento Portland CP II-Z e partículas de madeira proveniente de costaneiras de oito espécies tropicais: *Eschweilera coriaceae*, *Swartzia recurva*, *Manilkara amazonica*, *Inga paraensis*, *Inga alba*, *Eschweilera odora*, *Pouteria guianensis* e *Byrsonima crispera*. O grau de compatibilidade entre o cimento e as espécies, *in natura* e após pré-tratamento de imersão em água fria, foi determinado através de três métodos tradicionalmente usados na literatura: T_R , fator- C_A e Índice de Inibição. Os três índices apontaram comportamentos semelhantes com diferenças de intensidade, sendo o índice de inibição o que apresentou resultados mais evidentes e de fácil compreensão. Contudo, o grau de inibição não pode ser diretamente correlacionado com valores quantitativos de extrativos obtidos por diferentes solventes. Das espécies estudadas, seis espécies foram classificadas como de baixa inibição: *Eschweilera coriaceae*, *Manilkara amazonica*, *Inga paraensis*, *Inga alba*, *Pouteria guianensis* e *Byrsonima crispera*. Entretanto, não foi encontrada correlação direta entre os índices de inibição e as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos madeira-cimento (1:2,75) com adição de 3% de $CaCl_2$. Os compósitos com melhores propriedades mecânicas foram os produzidos com partículas de *Eschweilera coriaceae*, *Manilkara amazonica* e *Swartzia recurva*, porém a determinação do índice de inibição foi importante para a indicação do tipo de aditivo usado na produção de compósitos de *Eschweilera coriaceae* e *Eschweilera odora*. Em comparação com o uso de $MgCl_2$ ou cal hidratada, o aditivo $CaCl_2$ só foi mais eficiente na espécie de baixa de inibição. Para o método de vibro-compactação, dois parâmetros foram importantes na determinação da massa específica final do compósito e, consequentemente, de suas propriedades físicas e mecânicas: 1) a massa específica básica da espécie utilizada, uma vez que baixas massa específicas acarretam em um volume maior de partículas. Diferente do processo tradicional de prensa de pratos, no processo de vibro-compactação não há pressão e a utilização de grande quantidade de material torna-se inviável; 2) o formato do molde utilizado na formação do compósito. Em moldes menores, com menos espaços livres, as partículas são obrigadas a se acomodarem de maneira mais compacta, resultando em compósitos mais densos. Uma vez considerada a diferença de massa específica entre metodologias de produção, compósitos madeira-cimento produzidos pelo método de vibro-compactação com partículas de *Pouteria guianensis* possuíram propriedades físicas e mecânicas semelhantes aos painéis produzidos pelo método tradicional de prensa de pratos. Outros parâmetros que também devem ser considerados na produção por vibro-compactação foi a granulometria das partículas de madeira e sua relação com a proporção madeira:cimento utilizada na mistura. Ao utilizar uma vibração com impacto vertical de 220 N, partículas de maior granulometria (entre 4 e 9,52 mm) tendem a vibrar menos e não se acomodarem com a mesma eficiência do que partículas menores (entre 1,4 e 2,36 mm).

Palavras chaves: Compósito madeira-cimento. Espécies tropicais. Adensamento por vibro-compactação.

ABSTRACT

The aim of this work was the evaluation of viability and parameters of the vibrocompaction densification in the production of wood-cement composites formed by the mixture of Portland cement CP II-Z and wood particles from slabs of eight tropical species: *Eschweilera coriacea*, *Swartzia recurva*, *Manilkara amazonica*, *Inga paraensis*, *Inga alba*, *Eschweilera odora*, *Pouteria guianensis* and *Byrsonima crista*. The compatibility degree between cement and wood, in natura and after pre-treatment of cold water immersion, was achieved by three traditional methods found in the literature: T_R , C_A -factor and Inhibitory Index. All three indexes indicated similar results with different intensity. The Inhibitory Index presented more evident and easier to comprehend results. However, the inhibitory degrees weren't direct related to the amount of extractives obtained with different solutions. From the studied species, six were classified as species with low inhibitory characteristics: *Eschweilera coriacea*, *Manilkara amazonica*, *Inga paraensis*, *Inga alba*, *Pouteria guianensis* and *Byrsonima crista*. Nevertheless, the correlation between the inhibitory index and the final physical and mechanical properties of the wood-cement composites (1:2,75 based on the components dry weight) with 3% $CaCl_2$ addition. The composites with better mechanical properties were the ones produced with particles of *Eschweilera coriacea*, *Manilkara amazonica* and *Swartzia recurva*. On the other hand, the inhibitory index was important to indicate the type of additive used in composites made of *Eschweilera coriacea* and *Eschweilera odora*. Compared with $MgCl_2$ and hydrated lime, the $CaCl_2$ additive was more efficient for the species with lower index value. For the vibrocompaction method, two parameters were important to determine the composite density and, by consequence, the physical and mechanical properties: 1) the basic density of the species used, as lighter wood produce higher volume of particles. Different from the traditional method of cold press, when vibrocompaction process is used, that is no pressure applied and the use of high amount of material becomes unviable. 2) The shape of the mold used for the composite formation. In small molds, with less free space, the particles have to accommodate more compacted and tend to produce heavier composites. Once the density difference between composites produced by vibrocompaction ou cold press is considered, composites of *Pouteria guianensis* presented similar physical and mechanical methods for both methods. Other parameter that should be considered in the vibrocompaction method is the particles size and their relation with the mixture cement:wood proportion. If a vibration of 220 N vertical impact is used, bigger particles (between 4 and 9,52 mm) tend to vibrate less and have a poor densification than small particles (between 1,4 and 2,36 mm)

Key words: Wood-cement composites. Tropical species. Densification by vibrocompaction

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. GRÃO DE UM CLÍNQUER DE CIMENTO PORTLAND COM UMA FACE CORTADA E POLIDA.	21
FIGURA 2.2. IMAGEM DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE UM CLÍNQUER DE CIMENTO	23
FIGURA 2.3. REPRESENTAÇÃO DA CURVA TEMPERATURA-TEMPO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.	24
FIGURA 3.1. LOCALIZAÇÃO DA EEST (02O 37' S, 60O 11' W) INDICADA PELA SETA.	90
FIGURA 3.2. GRÁFICOS DA REAÇÃO EXOTÉRMICA ENTRE MADEIRA <i>IN NATURA</i> E CIMENTO NAS PRIMEIRAS 48 HORAS.	99
FIGURA 3.3. GRÁFICOS DA REAÇÃO EXOTÉRMICA ENTRE CIMENTO E MADEIRA PRÉ-TRATADA EM ÁGUA FRIA NAS PRIMEIRAS 48 HORAS	101
FIGURA 3.4. VALORES DE T_R PARA A MISTURA DE OITO ESPÉCIES TROPICAIS E O CIMENTO PORTLAND TIPO II ANTES E DEPOIS DO TRATAMENTO COM ÁGUA FRIA.	102
FIGURA 3.5. VALORES DE FATOR- C_A PARA A MISTURA DE OITO ESPÉCIES TROPICAIS E O CIMENTO PORTLAND TIPO II ANTES E DEPOIS DO TRATAMENTO COM ÁGUA FRIA.	103
FIGURA 3.6. VALORES DE II PARA A MISTURA DE OITO ESPÉCIES TROPICAIS E O CIMENTO PORTLAND TIPO II ANTES E DEPOIS DO TRATAMENTO COM ÁGUA FRIA.	104
FIGURA 4.1. QUANTIDADES DOS MATERIAIS USADOS NA MISTURA.....	116
FIGURA 4.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MOLDE PRISMÁTICO.....	116
FIGURA 4.3. FOTO E ESQUEMA DO VIBRADOR WÜRGES UTILIZADO NA MESA VIBRATÓRIA	117
FIGURA 4.4. MESA VIBRATÓRIA SEM E COM A PRESENÇA DO MOLDE FORMADOR.....	117
FIGURA 4.5. ESQUEMA PARA MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE ESPESSURA NO CORPO DE PROVA	119
FIGURA 4.6. ESQUEMA DE POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA	119
FIGURA 4.7. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIOS DE LIGAÇÃO INTERNA	121
FIGURA 4.8. ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS MOLDES PARA CONFEÇÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS	122
FIGURA 4.9. FOTOS DAS PARTÍCULAS DAS OITO ESPÉCIES TROPICAIS UTILIZADAS NA FABRICAÇÃO DAS CHAPAS DE MADEIRA-CIMENTO	124
FIGURA 4.10. APARÊNCIA SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA	127
FIGURA 4.11. MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DAS MADEIRAS TROPICAIS E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO	132

FIGURA 4.12. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 2 E 24 HORAS DE IMERSÃO POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA	133
FIGURA 4.13. VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 2 E 24 HORAS DE IMERSÃO EM ÁGUA POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA.....	135
FIGURA 4.14. VALORES MÉDIOS DE LIGAÇÃO INTERNA POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA	139
FIGURA 4.15. VALORES MÉDIOS PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MOR POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA	141
FIGURA 4.16. VALORES MÉDIOS PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MOE POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA	142
FIGURA 4.17. VALORES MÉDIOS PARA A PROPRIEDADE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA.....	143
FIGURA 4.18. DENDROGRAMA DA ANÁLISE DE CLUSTER PELO MÉTODO DA LIGAÇÃO COMPLETA	144
FIGURA 5.1. APARÊNCIA VISUAL DOS CORPOS DE PROVA.....	153
FIGURA 5.2. MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS	157
FIGURA 5.3. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 2 (A) E 24HORAS (B) DE IMERSÃO	158
FIGURA 5.4. VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 2 (A) E 24HORAS (B) DE IMERSÃO EM ÁGUA	160
FIGURA 5.5. PROPRIEDADE DE LIGAÇÃO INTERNA	163
FIGURA 5.6. MÉDIA DE VALORES DO MÓDULO DE RUPTURA	164
FIGURA 5.7. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE	165
FIGURA 6.1. ESQUEMA PARA CORTE DE CORPOS DE PROVA.....	172
FIGURA 6.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MOLDE UTILIZADO PARA A FORMAÇÃO DE COMPÓSITOS DO TRATAMENTO T2.....	173
FIGURA 6.3. ESQUEMA DE CORTES DE CORPOS DE PROVA PARA PAINÉIS PRODUZIDOS PELO MÉTODO DE ADENSAMENTO POR VIBRO-COMPACTAÇÃO	174
FIGURA 6.4. ESQUEMA DE MONTAGEM DOS PAINÉIS COMO COLOCADOS NA PRENSA DE PRATOS	175
FIGURA 6.5. ESQUEMA DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA PARA OS COMPÓSITOS T3	175
FIGURA 6.6. FOTOGRAFIA DE UM CORPO DE PROVA DO TRATAMENTO T1.	177
FIGURA 6.7. FOTOGRAFIA DE UM PAINEL DO TRATAMENTO T2.	178
FIGURA 6.8. DETALHES PARA A IRREGULARIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS NOS PAINÉIS INTEIROS PRODUZIDOS PELO MÉTODO VIBRO-DINÂMICO. 1 - IRREGULARIDADE VERTICAL; 2 - IRREGULARIDADE HORIZONTAL.	178
FIGURA 6.9. VARIAÇÃO DE ESPESSURA NO PERFIL DE PAINÉIS MADEIRACIMENTO PRODUZIDOS PELO MÉTODO VIBRO-DINÂMICO	179
FIGURA 6.10. FOTO DO COMPÓSITO PRODUZIDO POR PRENSA DE PRATOS (T3)	180

FIGURA 6.10. VARIAÇÃO DE ESPESSURA NO PERFIL DE PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS PELO MÉTODO DA PRENSA DE PRATOS.	180
FIGURA 6.11. MASSA ESPECÍFICA MÉDIA DOS COMPÓSITOS	182
FIGURA 6.12. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 2 E 24 HORAS DE IMERSÃO	183
FIGURA 6.13. VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 2 E 24 HORAS DE IMERSÃO	184
FIGURA 6.14. VALORES MÉDIOS DE LIGAÇÃO INTERNA	186
FIGURA 6.15. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE RUPTURA	187
FIGURA 6.16. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE.	188
FIGURA 7.1. ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA	197
FIGURA 7.2. ENSAIO DE LIGAÇÃO INTERNA	197
FIGURA 7.3. COMPARAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE <i>Swartzia recurva</i>	198
FIGURA 7.4. COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS P1 E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO	200
FIGURA 7.5. COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS P2 E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO	201
FIGURA 7.6. COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS P3 E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO	202
FIGURA 7.7. MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS DE DIFERENTES TAMANHOS E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO	206
FIGURA 7.8. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 2 E 24HORAS DE IMERSÃO	207
FIGURA 7.9. VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 2 E 24HORAS DE IMERSÃO	209
FIGURA 7.10. VALORES MÉDIOS DE LIGAÇÃO INTERNA	212
FIGURA 7.11. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE RUPTURA	214
FIGURA 7.12. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE	215

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. PORCENTAGEM TÍPICA DE MATÉRIAS-PRIMAS APRESENTADAS NO CIMENTO TIPO PORTLAND	21
TABELA 2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO CIMENTO PORTLAND TIPO II	22
TABELA 2.3. VALORES DE MOE ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE DIVERSAS ESPÉCIES COM ADIÇÃO DE 3% DE CaCl_2	59
TABELA 2.4. VALORES DE MOR ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE DIVERSAS ESPÉCIES COM ADIÇÃO DE 3% DE CaCl_2	60
TABELA 2.5. VALORES DE LIGAÇÃO INTERNA ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE DIVERSAS ESPÉCIES COM ADIÇÃO DE 3% DE CaCl_2	62
TABELA 2.6. GRAUS DE COMPATIBILIDADE ENTRE ESPÉCIES TROPICAIS E CIMENTO TIPO PORTLAND RELATADOS NA LITERATURA.....	64
TABELA 2.7. VALORES DE PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA DE <i>Inga alba</i>	70
TABELA 2.8. PROPRIEDADES QUÍMICAS DA ESPÉCIE <i>Eschweilera odora</i>	71
TABELA 2.9. PROPRIEDADES QUÍMICAS DA ESPÉCIE <i>Pouteria guianensis</i>	71
TABELA 3.1. LISTA DE ESPÉCIES TROPICAIS UTILIZADAS NA PESQUISA.....	91
TABELA 3.2. TEORES MÉDIOS DE EXTRATIVOS (%).....	95
TABELA 3.3. VALORES MÉDIOS DE TEOR DE CINZAS E pH DAS ESPÉCIES ESTUDADAS.....	97
TABELA 3.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MONOSSACARÍDEOS DAS ESPÉCIES ESTUDADAS APÓS PRÉ-TRATAMENTO EM ÁGUA FRIA (EM %).....	98
TABELA 3.5. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE ANÁLISES QUÍMICAS DAS MADEIRAS E OS TESTES DE COMPATIBILIDADE ENTRE MADEIRA-CIMENTO.....	106
TABELA 3.6. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE QUANTIDADE DE MONOSSACARÍDEOS PRESENTE NAS MADEIRAS E OS TESTES DE COMPATIBILIDADE ENTRE MADEIRA-CIMENTO	106
TABELA 4.1. LISTA DE ESPÉCIES TROPICAIS UTILIZADAS NA PESQUISA.....	113
TABELA 4.2. VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS DE MADEIRAS DAS ESPÉCIES TROPICAIS...125	
TABELA 4.3. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE AS VARIÁVEIS DA GEOMETRIA DAS PARTÍCULAS E A MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DA MADEIRA.....	127
TABELA 4.4. PROPRIEDADE FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS.....	128

TABELA 4.5. CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E A MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS E DA MADEIRA E ÁREA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS.....	129
TABELA 4.6. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE QUANTIDADE DE MONOSSACARÍDEOS PRESENTE NAS MADEIRAS E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS.....	131
TABELA 4.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS.	136
TABELA 4.8. CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E A MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS E DA MADEIRA, ÁREA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS E ÍNDICES DE INIBIÇÃO.	137
TABELA 4.9. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE QUANTIDADE DE MONOSSACARÍDEOS NAS MADEIRAS E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS.....	138
TABELA 5.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	151
TABELA 5.2. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS.	154
TABELA 5.3. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS	155
TABELA 5.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS.	161
TABELA 5.5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO	162
TABELA 6.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	172
TABELA 6.2. TESTES DE PROPRIEDADE FÍSICA E MECÂNICA E SUAS RESPECTIVAS NORMAS	176
TABELA 6.3. PROPRIEDADE FÍSICAS DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS.....	181
TABELA 6.4. PROPRIEDADE MECÂNICAS DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS.....	185
TABELA 6.5. EQUAÇÕES DE REGRESSÃO INDICANDO A RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS E A MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS	188
TABELA 7.1. CLASSIFICAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA	194
TABELA 7.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	195
TABELA 7.3. VALORES MÉDIOS DO ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DAS DIFERENTES GRANULOMETRIAS	199
TABELA 7.4. PROPRIEDADE FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO	203
TABELA 7.5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO	204

TABELA 7.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITO MADEIRA-CIMENTO	210
TABELA 7.5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO	211

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	- Absorção de água
a/c	- Relação água-cimento
AS	- Área superficial
C	- Cimento
C ₃ A	- Aluminato cálcico
C ₄ AF	- Ferroaluminato
C ₃ S	- Silicato tricálcico
C ₂ S	- Silicato bicálcico
C-S-H	- Silicato de Cálcio Hidratado
DAP	- Diâmetro a altura do peito
EEST	- Estação Experimental de Silvicultura Tropical
FE	- Flexão estática
IdE	- Índice de esbeltez
IE	- Inchamento em espessura
II	- Índice de inibição
INPA	- Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
LI	- Ligação interna
M	- Madeira
ME	- Massa específica
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
MOE	- Módulo de elasticidade
MOR	- Módulo de ruptura
RC	- Resistência à compressão
RP	- Razão de planicidade
S	- Incremento da temperatura
t	- Tempo
T	- Temperatura
TU	- Teor de umidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. OBJETIVOS.....	18
1.1.1. Objetivo principal.....	18
1.1.2. Objetivo específicos	18
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. CIMENTO PORTLAND	20
2.1.1. Composição	21
2.1.2. Hidratação do cimento	23
2.2. INIBIÇÃO	26
2.2.1. Causa da inibição.....	26
2.2.2. pH.....	29
2.3. COMPATIBILIDADE	29
2.3.1. Testes para determinar a compatibilidade entre madeira e cimento	30
2.4 . ELEMENTOS QUÍMICOS DA MADEIRA QUE CAUSAM INIBIÇÃO.....	38
2.4.1. Extrativos	39
2.4.2 . Polissacarídeos	42
2.4.3 . Lignina.....	44
2.5. PRÉ-TRATAMENTOS: MÉTODOS DE EXTRAÇÃO.....	44
2.5.1. Método de extração: Água fria	45
2.5.2 . Método de extração: Água quente	46
2.5.3. Método de extração: Acetona	47
2.5.4 . Método de extração: Solução alcalina.....	47
2.5.5 . Método de extração: Metanol.....	48
2.6. ADITIVOS QUÍMICOS.....	49
2.7. FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DOS PAINÉIS MADEIRA- CIMENTO	51
2.7.1. Relação madeira:cimento.....	51
2.7.2. Quantidade de água.....	52
2.7.3 . Dimensões das partículas	54
2.7.4. Presença de casca.....	54
2.7.5. Fatores de prensagem	55
2.7.6. Umidade de equilíbrio	56
2.7.7. Tempo de cura	57
2.8. PROPRIEDADES DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO.....	58
2.8.1. Flexão estática	58
2.8.2 . Ligação Interna.....	61
2.8.3. Absorção de água e inchamento de espessura	63
2.9. PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE ESPÉCIES TROPICAIS.....	63
2.10 . ESPÉCIES DE MADEIRA.....	66
2.10.1. <i>Eschweilera coriaceae</i> (DC.) Mart.....	66
2.10.2. <i>Swartzia recurva</i> Poepping	67
2.10.3. <i>Manilkara amazonica</i> (Huber) Standley	68
2.10.4. <i>Inga paraensis</i> Ducke.....	68
2.10.5. <i>Inga alba</i> (Sw.) Willd.	69
2.10.6. <i>Eschweilera odora</i> (poepp.) Miers.....	70
2.10.7. <i>Pouteria guianensis</i> Aubl.....	71
2.10.8. <i>Byrsonima crisper</i> A. Juss	72

2.11. REFERÊNCIAS	72
3. COMPATIBILIDADE ENTRE MADEIRA DE ESPÉCIES TROPICAIS E O CIMENTO PORTLAND TIPO II	89
3.1. INTRODUÇÃO.....	89
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	90
3.2.1. Preparo do material.....	90
3.2.2. Teste de hidratação.....	92
3.2.3. Análise química	93
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
3.3.1. Análise química quantitativa.....	94
3.3.2. Análise química dos monossacarídeos	98
3.3.3. Testes de hidratação.....	99
3.3.4. Índices de inibição.....	102
3.3.5. Correlação linear de Pearson.....	105
3.4. CONCLUSÃO	107
3.5. REFERÊNCIAS	107
4. PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS	112
4.1. INTRODUÇÃO.....	112
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS	113
4.2.1. Preparo das partículas	114
4.2.2. Geometria das partículas	114
4.2.3. Manufatura dos compósitos	115
4.2.4. Determinação das propriedades físicas e mecânicas	118
4.2.5. Análise estatística	122
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	123
4.3.1. Granulometria das partículas	123
4.3.2. Propriedades físicas dos compósitos	127
4.3.3. Propriedades mecânicas dos compósitos	135
4.3.4. Análise de cluster	143
4.4. CONCLUSÃO	145
4.5. REFERÊNCIAS	145
5. USO DE ADITIVOS QUÍMICOS NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO DE <i>Eschweilera coriacea</i> E <i>Eschweilera odora</i> PELO MÉTODO DE VIBRO-COMPACTAÇÃO.	148
5.1. INTRODUÇÃO.....	148
5.2. MATERIAIS E MÉTODOS	150
5.2.1. Aditivos químicos	150
5.2.2. Confecção dos corpos de prova.....	151
5.2.3. Ensaio físicos e mecânicos	152
5.2.4. Análise estatística	152
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	152
5.3.1. Propriedades físicas dos compósitos.....	152
5.3.2. Propriedades mecânicas dos compósitos	161
5.4. CONCLUSÃO	166
5.5. REFERÊNCIAS	166
6. COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO DE <i>Pouteria guianensis</i> PRODUZIDOS POR VIBRO-COMPACTAÇÃO E POR PRENSA DE PRATOS.....	169
6.1. INTRODUÇÃO.....	169

6.2. MATERIAIS E MÉTODOS	170
6.2.1. Preparo das partículas	170
6.2.2. Produção de compósitos madeira-cimento	171
6.2.4. Determinação das propriedades físicas e mecânicas	176
6.2.5. Análise estatística	176
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	177
6.3.1. Aparência visual	177
6.3.2. Propriedades físicas.....	181
6.3.3. Propriedades mecânicas.....	185
6.3.4 . Equações de regressão	188
6.4. CONCLUSÃO	189
6.5. REFERÊNCIAS	190
7. PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PELO MÉTODO DE VIBRO-COMPACTAÇÃO COM DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE PARTÍCULAS DE <i>Swartzia recurva</i> E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO.....	192
7.1. INTRODUÇÃO.....	192
7.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	193
7.2.1. Preparo das partículas	193
7.2.2. Geometria das partículas	194
7.2.3. Manufatura dos corpos de prova.....	195
7.2.4. Determinação das propriedades físicas e mecânicas	196
7.2.5 . Análise estatística	198
7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	198
7.3.1 . Granulometria das partículas	198
7.3.2 . Propriedades físicas.....	199
7.3.3. Propriedades mecânicas.....	210
7.4. CONCLUSÃO	216
7.5. REFERÊNCIAS	217
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	220

1. INTRODUÇÃO

A história dos painéis formados por madeira e material inorgânico teve início em 1900, na Áustria. Porém, o desenvolvimento desta tecnologia sempre esteve ligado à necessidade em períodos de crise. Durante a Segunda Guerra Mundial, materiais tipicamente usados para construção, como metal e madeira sólida, passaram a ser considerados estratégicos e tiveram seu uso severamente limitado. Compósitos madeira-cimento surgiram como alternativa para material de construções temporárias e reconstrução devido a possibilidade de se utilizar resíduo de madeira e ao seu baixo custo de produção.

Na década de 1970, foi a baixa oferta de outro material que impulsionou o desenvolvimento da indústria de compósitos. Com a crise do petróleo de 1973 e 1979, o mundo notou sua dependência neste produto e passou a procurar por materiais alternativos em todas as áreas. Nas indústrias de painéis de madeira, esta dependência foi observada principalmente no uso de adesivos fenólicos. E mais uma vez, as pesquisas voltaram sua atenção ao uso da mistura de partículas de madeiras misturados ao cimento como material aglutinante.

Mas as crises não vieram apenas das indústrias de produtos derivados de madeira. No final dos anos 1990, a Organização Mundial de Saúde considerou a fibra de amianto como um produto cancerígeno em qualquer estágio de produção, transformação e uso. Vários países proibiram então seu uso, e a indústria de concreto que utilizava esta fibra no reforço da matriz cimentícia passou a estudar a possibilidade do uso alternativo de fibras orgânicas.

Durante os anos 2000, a atenção para uma nova crise, desta vez ambiental, tomou as manchetes de todo o mundo após a assinatura do Protocolo de Kyoto. A principal meta do Protocolo é o controle de emissão de gases que causam o chamado efeito estufa. Dentre estes gases, o dióxido de carbono (CO₂) seria o mais crítico. A necessidade de redução da emissão deste gás afeta diretamente a construção civil que hoje é responsável aproximadamente por 40% das emissões de carbono (KILBERT, 2013)¹. A incorporação de madeira em uma matriz de cimento passou a ter um novo atrativo. Ao contrário da crença popular, a importância do uso

¹ KILBERT, C.J. **Sustainable construction: green building design and delivery**. 3ª edição. John Wiley & Sons. 2013. 560p.

de madeira na construção civil não está na sua capacidade de retenção de CO₂, pois esta é pequena em relação à emissão total de uma obra. Muito mais importante do que a retenção é a própria emissão. Por exemplo, a substituição de materiais como tijolos, alumínio, aço e concreto por madeira pode diminuir a emissão de CO₂ em até 15 vezes a sua capacidade de retenção (BUCHANAN; LEVINE, 1999)².

Porém a popularização deste produto ainda encontra algumas barreiras que justificam o seu estudo. Hoje em dia, o alto custo inicial de implementação de uma indústria de painéis madeira-cimento reduzem significativamente a possibilidade de produção em grande escala do compósito. O desenvolvimento de uma metodologia mais simples e barata seria um atrativo a mais para a produção em pequenas cooperativas ou, até mesmo, para que o usuário final possa produzir o seu próprio material. Um segundo empecilho para compósitos madeira-cimento no Brasil é a falta de informação no uso de madeiras tropicais. Madeiras com altos teores de extrativos tendem a inibir a cura do cimento e produzir compósitos com propriedades físicas e mecânicas ruins. Porém, esta tendência não deve ser generalizada, pois, a inibição é causada não somente pela quantidade, mas também pela composição dos extrativos. Assim, nem toda madeira tropical deve ser prontamente descartada como uma possível matéria-prima.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo principal

Avaliar a produção de compósitos madeira cimento produzidos com espécies da Amazônia e cimento Portland tipo CP II - Z pelo método de vibro-compactação

1.1.2. Objetivo específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

a) Determinar o grau de inibição entre cimento Portland tipo CP II - Z e madeiras de oito espécies tropicais da Amazônia;

² BUCHANAN, A.H., LEVINE, S. B. Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science & Policy*. v. 2. p.427-437. 1999.

- b) Determinar os componentes químicos das madeiras estudadas que são responsáveis pelo comportamento inibitório na cura inicial do cimento;
- c) Verificar a viabilidade de produção de compósitos madeira-cimento com espécies tropicais através da metodologia de adensamento por vibro-compactação;
- d) Analisar o efeito de diferentes aditivos químicos nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos produzidos com madeiras de espécies de alta e baixa inibição à cura do cimento;
- e) Verificar a possibilidade de produção de corpos de prova de pequenas dimensões para determinação de propriedades de painéis produzidos pelo método de vibro-compactação;
- f) Comparar as propriedades físicas e mecânicas de compósitos madeira-cimento produzidos pelo método de adensamento por vibro-compactação com compósitos produzidos pelo método tradicional de prensa de pratos;
- g) Identificar a granulometria de partículas de madeira mais adequada para a produção pelo método de vibro-compactação;
- h) Identificar a relação madeira:cimento mais adequada para produção de compósitos pelo método de vibro-compactação.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A combinação entre madeira e fibras vegetais com cimento é praticada desde o início do século XX. O cimento melhora a durabilidade, resistência à umidade e a ataques biológicos do material vegetal, enquanto que a resistência à fratura do cimento é aumentada pelas partículas de madeira. O sucesso desta combinação depende do entendimento de suas interações químicas e propriedades do material resultante (STOKKE *et al.*, 2014)

2.1. CIMENTO PORTLAND

O cimento é um material inorgânico de baixa granulometria que, quando misturado com água, forma uma pasta que endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, mesmo depois de seu endurecimento, mantém sua resistência e estabilidade. Ele é obtido pela reação térmica (na ordem de 1450°C) da mistura de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e, eventualmente, outras substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro (VIEIRA, 2010). Os óxidos necessários para hidratação são extraídos destas matérias-primas principais. O carbonato de cálcio (CaCO_3) aquecido em alta temperatura forma a cal (CaO) e libera CO_2 para atmosfera. Já da argila são extraídos os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 .

Com o cozimento das matérias-primas, novos compostos são formados por reações químicas, que ao esfriar, aglomeram-se em partículas chamadas de clínquer, que podem variar de 2 a 20 mm de diâmetro (VIEIRA, 2010). A figura 2.1 ilustra um grão de clínquer.



FIGURA 2.1. GRÃO DE UM CLÍNQUER DE CIMENTO PORTLAND COM UMA FACE CORTADA E POLIDA.

FONTE: (STUTZMAN, 2004, p. 958)

O clínquer é então moído com a adição de sulfato de cálcio e outras misturas como, por exemplo, material pozolanico e cinzas. A adição destes materiais serve para regular o tempo de pega, modificar as propriedades finais do produto e torná-lo mais econômico (VIEIRA, 2010).

2.1.1. Composição

A mistura das matérias-primas, calcários e argila é controlada de tal maneira que após a perda da água e do dióxido de carbono, devido à alta temperatura, apresente uma composição química similar à apresentada na tabela 2.1.

TABELA 2.1. PORCENTAGEM TÍPICA DE MATÉRIAS-PRIMAS APRESENTADAS NO CIMENTO TIPO PORTLAND

Nome	Fórmulas	Peso (%)
Óxido de cálcio	CaO	61 - 67
Óxido de silício	SiO_2	17 - 24
Óxido de alumínio	Al_2O_3	3 - 8
Óxido de ferro	Fe_2O_3	1 - 6
Óxido de magnésio	MgO	0,1 - 4
Óxido de sódio + Óxido de potássio	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0,5 - 1,5
Trióxido de enxofre	SO_3	1 - 3

FONTE: (GLASSER, 1997, p. 152)

A tabela 2.2 apresenta a composição química do cimento Portland tipo II, assim como a abreviatura normalmente utilizada na bibliografia técnico-científica especializada.

TABELA 2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO CIMENTO PORTLAND TIPO II

Nome	Abreviatura	Composição	Peso (%)
Silicato tricálcico	C ₃ S	3CaO.SiO ₂	42
Silicato bicálcico	C ₂ S	2CaO.SiO ₂	32
Aluminato cálcico	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	6
Ferroaluminato	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	12

FONTE: (STOKKE *et al.*, 2014, p. 228)

O silicato tricálcico (C₃S) apresenta grande número de polimorfos, porém com pouca variação de sua estrutura cristalina. É um constituinte essencial do clínquer e representa um papel importante na resistência mecânica do cimento (GOBBO, 2003).

O silicato bicálcico (C₂S) ocorre no cimento Portland em proporções menores do que o C₃S, mas mesmo assim é um dos componentes principais do clínquer e contribui significativamente nas resistências mecânicas do cimento após 28 dias. O polimorfismo do C₂S é importante na composição química do clínquer (GOBBO, 2003). Normalmente o polimorfo β é o mais encontrado, contudo pequenas quantidades de polimorfos α, α'_H e α'_I podem ocorrer em até 5% (STUTZMAN, 2004).

O aluminato cálcico (C₃A) é formado a partir da cristalização do material que se funde durante o processo de clínquerização. Normalmente tem estrutura cúbica ou ortorrômbica, isolados ou combinados (GOBBO, 2003). É encontrado preenchendo as áreas entre os ferroaluminato (C₄AF) e pode conter até 7% dos óxidos. Uma importante característica deste material é sua alta reatividade com a água (STUTZMAN, 2004).

O ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) é considerado de baixa reatividade hidráulica e tem como propriedade principal imprimir resistência à corrosão química do cimento. É o C₄AF o responsável pela coloração acinzentada do cimento devido à presença de ferro em sua constituição (GOBBO, 2003).

O C_4AF e o C_3A são muitas vezes denominados como a matriz do cimento, uma vez que ocorrem entre os cristais de silicato e aparentemente são responsáveis por sua adesão (STUTZMAN, 2004). A figura 2.2 apresenta uma imagem produzida por um microscópio eletrônico de varredura de uma possível configuração de um clínquer de cimento.

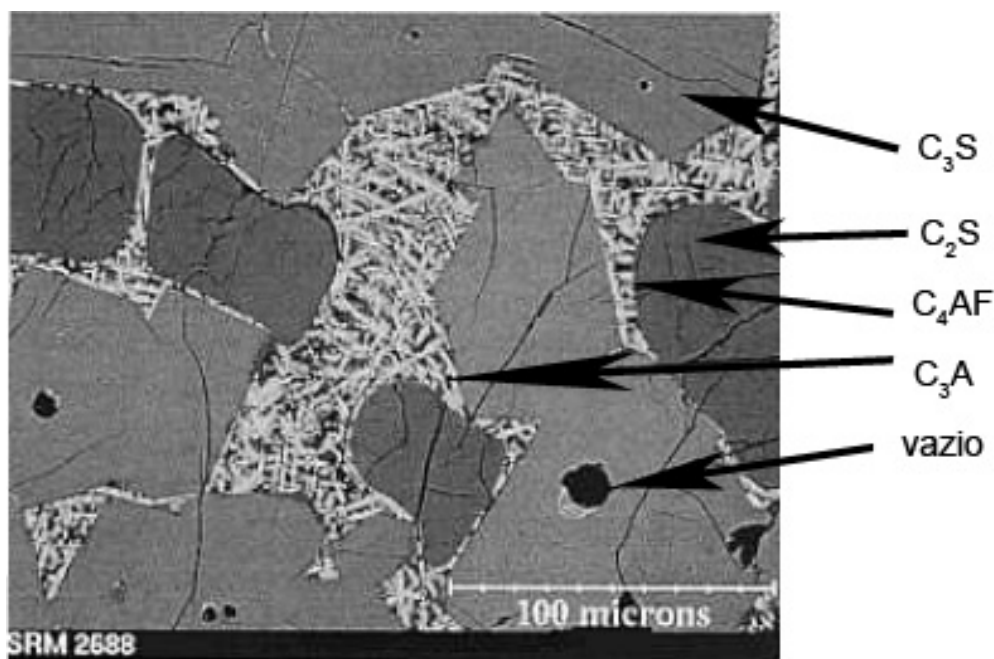


FIGURA 2.2. IMAGEM DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DE UM CLÍNQUER DE CIMENTO

FONTE: (STUTZMAN, 2004, p. 959)

2.1.2. Hidratação do cimento

Em termos estritamente químicos, hidratação é a reação de um componente anídrico com a água que resulta em um novo componente, um hidratado. Quando se trata de cimento, a hidratação é a reação entre um cimento não-hidratado, ou um de seus componentes, com água, associada tanto com a mudança química e físico-mecânica do sistema, e em particular, com a cura e o endurecimento.

Uma hidratação parcial do cimento pode acontecer graças a umidade do ar, mas para que seja completa o cimento deve ser misturado com uma quantidade suficiente de água. Esta taxa de mistura água/cimento (a/c) afeta a reologia (propriedade física que influencia o transporte de quantidade de movimento na mistura), o progresso da hidratação e ainda as propriedades do produto final. Uma

taxa a/c entre 0,3 e 0,6 apresenta uma pasta consistente e é chamada de pasta fresca de cimento. A cura e o endurecimento desta pasta ocorre à medida que há pasta fresca sendo convertida para uma pasta endurecida de cimento. O termo "cura" significa que houve uma perda repentina de plasticidade da pasta original e sua conversão para material sólido com uma recém adquirida capacidade de se medir resistência. Já o termo "endurecimento" significa o desenvolvimento de dureza e resistência que segue a cura da pasta (ODLER, 2003).

A hidratação do cimento Portland é um processo complexo que envolve uma série de reações químicas simultâneas e sucessivas. O processo acontece de forma espontânea com o contato do cimento com a água e é associado com a liberação de calor. O progresso da hidratação pode ser influenciado por uma série de fatores como: a composição e granulometria do cimento, a relação a/c, a temperatura de cura e presença de misturas e/ou aditivos na pasta (ODLER, 2003). Uma vez que cada fabricante de cimento possui sua própria fórmula é difícil precisar o tempo e a temperatura ideal para a cura do cimento. Contudo pode-se considerar que uma boa temperatura de cura varia entre 40° a 80°C e é alcançado entre 6 e 8 horas (SIMATUPANG *et al.*, 1991).

O típico gráfico de temperatura por tempo de cura do cimento é apresentado na figura 2.3.

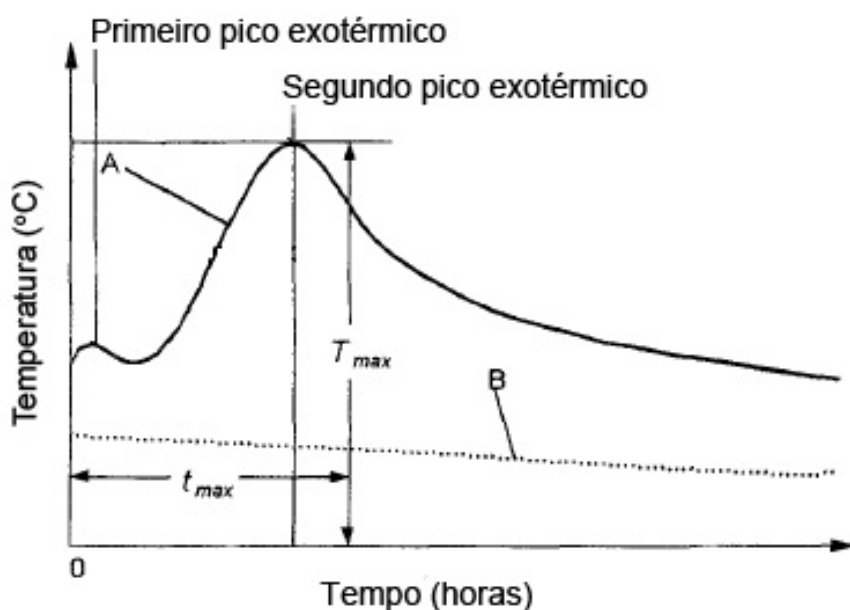


FIGURA 2.3. REPRESENTAÇÃO DA CURVA TEMPERATURA-TEMPO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.

SENDO: A, a curva do cimento; B, a temperatura ambiente; T_{max} , a temperatura máxima de hidratação; t_{max} , o tempo necessário para atingir a temperatura máxima.

FONTE: (WEI *et al.*, 2000 a, p. 299)

O gráfico de hidratação pode ser dividido em três partes principais, do início quando os componentes são misturados até se alcançar a temperatura máxima: 1. aumento inicial da temperatura (baixo aumento por um curto período); 2. período de dormência (a temperatura não aumenta, podendo até diminuir um pouco); e 3. rápido aumento de temperatura (MOSLEMI; LIM, 1984).

A intensa liberação de calor da primeira fase acontece graças a rápida hidratação do C_3S e C_3A . A hidratação parcial do sulfato de cálcio também pode contribuir para esse pico inicial de temperatura (ODLER, 2003). A hidratação do C_2S e C_3S resulta na formação do gel C-S-H ($Ca_3Si_2O_7 \cdot 3H_2O$) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) (EVANS, 2002).

Durante o período de dormência, pouca coisa ocorre, a não ser pela lenta precipitação de gel de C-S-H enquanto há um lento aumento na concentração de Ca^{2+} e OH^- (BACKE *et al.*, 2001).

Após este período de algumas horas (geralmente entre 3 e 12 horas), há o início da fase de cura do cimento onde pode ser observar um segundo e principal pico exotérmico. Isso acontece devido a hidratação do restante de C_3S e a formação da fase C-S-H (ODLER, 2003). A hidratação do C_3A e C_4AF continua, porém em menor medida. Neste período também pode ser observado o decréscimo da concentração de Ca^{2+} e OH^- devido a formação do trissulfoaluminato de cálcio hidratado, conhecido como etringita (VIEIRA, 2010).

Depois desta fase, a taxa de liberação de calor diminui gradativamente e alcança valores baixos após alguns dias. Com uma quantidade suficiente de água, o processo de hidratação pode continuar até o cimento original seja totalmente consumido. Porém, para baixas proporções de água-cimento, a reação pode parar graças a falta de quantidade suficiente de água necessária para o processo (ODLER, 2003).

2.2. INIBIÇÃO

2.2.1. Causa da inibição

Diversos problemas causam empecilhos para o desenvolvimento da indústria de painéis de madeira-cimento e entre as principais dificuldades está a seletividade das espécies de madeiras utilizadas (MOSLEMI; PFISTER, 1987).

Diversos estudos mostram que nem todas as espécies de madeiras são aptas a produção de painéis madeira-cimento. Mesmo utilizando uma metodologia de produção idêntica, algumas espécies de madeira formam painéis excelentes enquanto outras literalmente se desfazem (HOFSTRAND *et al.*, 1984). Isto ocorre devido a natureza orgânica da madeira que pode afetar negativamente as reações de cura do cimento (BIBLIS; LO, 1968). Segundo Latorraca *et al.* (1999), os componentes orgânicos afetam tanto a possível interação entre a madeira e o cimento, quanto as interações internas do próprio cimento, resultando em chapas de qualidade inferior. O efeito da madeira na cura do cimento é induzido por um conjunto de fatores, incluindo localização geográfica, época de corte, espécie, presença de casca, grau de deterioração e, principalmente, extrativos presentes na árvore (HOFSTRAND *et al.*, 1984).

Dentro de uma mesma espécie também pode haver diferentes níveis de inibição quando comparado o uso de cerne e alburno. Foi constatado, que para as espécies tropicais de Acácia, da Austrália, o cerne inibe a cura do cimento com maior intensidade do que o alburno. Porém a mesma relação não ocorreu para as espécies *Acacia mearnsii* e *Acacia melenoxylon*, que são espécies de clima temperado, e apresentaram um índice de inibição maior na madeira do alburno (SEMPLE; EVANS, 1998). A maior quantidade de alburno também foi responsável por maiores níveis de inibição do cimento quando misturados com oito diferentes espécies de Eucalipto de dois sítios distintos na Austrália. A provável explicação dada a este fenômeno foi a maior quantidade de polissacarídeos e extrativos fenólicos presente neste tipo de madeira e tidos como substâncias inibitórias da cura do cimento Portland (SEMPLE *et al.*, 2000).

Hachmi e Moslemi (1989) constataram que algumas espécies apresentam baixo índice de extrativos e mesmo assim são incompatíveis com o cimento

enquanto outras não inibem a cura embora tenham grande quantidade de extrativo, indicando que a composição química tem importância na inibição da cura.

Na secagem da madeira em forma de partículas acontece a migração dos componentes orgânicos para a superfície e formações cristalinas de açúcares são desenvolvidas quando a água é acrescentada na mistura madeira-cimento. Acredita-se que a inibição pode ser resultado da interferência desses cristais no cimento, afetando possíveis interligações mecânicas do cimento com a madeira e com o próprio cimento (AHN; MOSLEMI, 1980).

A influência negativa dos cristais de açúcares na hidratação do cimento pode ser explicada por quatro teorias: absorção, precipitação, complexação e controle de nucleação (YOUNG, 1972).

a) Absorção

Açúcares cobrem os grãos de cimento e criam uma camada impedindo a absorção de água. Assim, a partícula de cimento, sob forças moleculares, perdem a capacidade de coesão e endurecimento (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2003).

A explicação para a formação desta camada superficial é a ligação entre os grupos carboxilas e hidroxilas e a superfície dos íons Ca^{2+} e O^{2-} respectivamente. Porém as pontes de hidrogênio não são as únicas responsáveis pelo envolvimento das partículas de cimento, uma vez que também ocorre com elementos como o catecol ou o ácido maleico, que não possuem hidroxilas. Assim a quelação também é um mecanismo de absorção importante no processo de inibição da cura do cimento (YOUNG, 1972). A quelação é a reação entre um íon metálico e substâncias de múltiplos sítios chamadas de agentes quelantes (SKOOG *et al.*, 2006)

A absorção dos açúcares ocorre inicialmente na hidratação do C_3A e pode até funcionar como um acelerador. Porém se a capacidade de absorção do C_3A não for o suficiente para imobilizar todo o açúcar, este passa a agir como inibidor da hidratação do C_3S (YOUNG, 1972). Esse fenômeno explica porque a baixa concentração de elementos tidos como inibidores não afeta a cura do cimento (SIMATUPANG, 1990; MILLER; MOSLEMI, 1991 b; YASUDA *et al.*, 2002).

b) Precipitação

Os inibidores orgânicos formam componentes insolúveis quando em contato com o meio alcalino do cimento. Açúcares e ácidos de alto peso molecular seriam os

responsáveis pela formação destes elementos que funcionaria como barreira para o transporte, solubilidade e precipitação da água durante a cura do cimento (YOUNG, 1972).

Acredita-se que açúcares combinam-se com CaO para formar sacarato de cálcio que leva a aumentar a solubilidade da alumina (Al_2O_3) na solução. A precipitação do gel alumina-sílica sem cálcio ocorre cobrindo partículas de cimento, e assim, retardando a hidratação (THOMAS; BIRCHALL, 1983).

Porém, no início da mistura, a absorção será um processo muito competitivo e, embora alguma precipitação venha a ocorrer, seria praticamente impossível distinguir os processos. Se a precipitação fosse o processo principal, não haveria diferença entre a reação com C_3A e C_3S , uma vez que ambos liberam íons de Ca^+ na solução. Como a precipitação não explica a aceleração inicial da reação de cura, acredita-se que esse processo apenas exige maior quantidade de água na reação do que propriamente a inibe (YOUNG, 1972).

c) Complexação

A maioria dos íons metálicos reage com doadores de pares de elétrons para formar complexos (SKOOG *et al.*, 2006). Elementos inibitórios possuem átomos de oxigênio que podem se atrair. Isso indica que pode ocorrer quelação com íons de metal e que a complexação é um importante mecanismo na inibição. Por exemplo, a adição de grande quantidade de sacarose aumenta a quantidade de íons de Fe, Al e Ca na fase líquida da pasta de cimento. A complexação entre os íons e os elementos inibidores pode vir a ser a causa do aumento inicial da reatividade do cimento e do C_3A . Ao prevenir a precipitação inicial dos produtos da hidratação, mais componentes do cimento irão dissolver antes que a inibição seja bloqueada. Embora haja complexação com íons de Ca, esta não é forte o suficiente para contribuir na saturação de hidróxido de cálcio durante a hidratação de C_3S (YOUNG, 1972).

Estudos sobre a capacidade de inibição da cura de cimento por ação de açúcares não encontraram uma correlação simples entre a capacidade de ligação do cálcio e graus de inibição (THOMAS; BIRCHALL, 1983).

d) Nucleação

Inibidores orgânicos podem influenciar a morfologia e a quantidade de cristais de hidróxido de cálcio formado em pastas de C_3S . A inibição da nucleação do cristal

de Ca(OH)_2 ocorre naturalmente na presença de íons de Si presente no cimento. O crescimento do cristal é pausado até ocorra uma saturação de Ca(OH)_2 . A adição de elementos orgânicos piora a inibição pois estes são em maiores quantidades e mais reativos do que os íons de Si. Conseqüentemente, há um aumento na quantidade de Ca(OH)_2 para a retomada do crescimento (YOUNG, 1972). Este processo explica a formação de cristais maiores quando há mistura de aditivos como CaCl_2 (AHN; MOSLEMI, 1980). Este sal que produz rapidamente a saturação de Ca(OH)_2 e acelera sua cristalização, sem necessitar da liberação de íons de Ca da estrutura C_3S (YOUNG, 1972).

2.2.2. pH

Alguns autores ainda levantam a questão do efeito do pH dos extrativos presente na madeira como causa da inibição na cura do cimento. Sabe-se que durante a cura do cimento, hidróxido de cálcio é liberado e o pH da solução passa a ser acima de 12. Geralmente os extrativos de material vegetal é ácido, por exemplo, estudos feitos com fibras de coco e sisal (*Agave sisalana*) indicaram pH de 6,3 e 5,3 respectivamente. Assim sendo, o pH da solução é afetado e pode mudar a solubilidade e estabilidade dos elementos da hidratação, tendo um efeito negativo na cura (AGGARWAL; SINGH, 1990).

O estudo de extrativos de *Pinus pinaster* e *Populus* sp. apontou que seus extrativos apresentaram pH ácido (entre 4 e 6) que aumentam a condutividade térmica da solução madeira-cimento. O pH da solução não afeta diretamente a hidratação do C-S-H, mas define seu grau de inibição (BOUSTINGORRY *et al.*, 2005).

2.3. COMPATIBILIDADE

O termo *compatibilidade*, quando aplicado a área de pesquisa de compósitos de madeira-cimento, refere-se ao grau da cura do cimento após misturado com água e com uma quantidade de madeira em forma de partículas. Em geral, se o processo químico do endurecimento do cimento não for afetado, ou apenas levemente afetado, pela presença da madeira, este cimento e esta madeira são considerados compatíveis. Por outro lado, se o endurecimento do cimento é impedido pela

presença da madeira, eles são tidos como incompatíveis. Este fenômeno de interação é comumente expresso por diminuir as propriedades físicas do composto, podendo até criar corpos de prova sem nenhuma integridade física (JORGE *et al.*, 2004).

2.3.1. Testes para determinar a compatibilidade entre madeira e cimento

Tradicionalmente existem dois métodos usados para se determinar o tempo de cura do cimento: *Vicat* e *Gillmore*. Ambos instrumentos consistem em medir a resistência da pasta de cimento à penetração de uma agulha, sendo que o método de *Gillmore* é determinado pela norma ASTM C 266 (2004). Estes testes podem ser usados para se medir o efeito tanto de retardantes quanto de aceleradores da cura, porém não são recomendados para o caso de misturas de madeira-cimento. Isso porque a presença de partículas de madeira podem interferir na penetração da agulha (KARADE *et al.*, 2003).

Porém, alguns pesquisadores ainda utilizam este método para determinar a compatibilidade da madeira de forma indireta. A pasta do cimento pode ser feita com a água resultante do processo de extração da madeira. Desta maneira o instrumento de *Vicat* pode medir a variação no tempo de cura do cimento afetado pelos extrativos da madeira sem a interferência física da partícula (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2006). Contudo, desta forma apenas avalia-se os extrativos da madeira solúveis em água, ignorando outras possíveis reações.

Muitos pesquisadores (SANDERMANN; KOHLER, 1964, WEATHERWAX; TARKOW, 1964, 1967, HOFSTRAND *et al.*, 1984, MOSLEMI; LIM, 1984) já desenvolveram métodos matemáticos para classificar diferentes espécies de madeira de acordo com o grau de inibição quanto à cura do cimento. Através destas equações, os chamados índices de inibição comparam uma ou mais características da hidratação do cimento, como temperatura de hidratação, tempo para atingir a temperatura máxima e a relação da curva da temperatura máxima/ tempo de hidratação do cimento puro e a mistura madeira-cimento (OYAGADE, 1994).

Quando o cimento é misturado com a madeira, a temperatura da primeira fase da reação pode ser superior a da reação do cimento puro com a água. Isso possivelmente ocorre pela presença de extrativos em certas madeiras que aceleram

a hidratação do C₃A. Assim o primeiro pico deve ser ignorado na busca de um fator de inibição entre madeira-cimento e apenas o pico principal referente a formação do C-S-H deve ser considerado (WEI *et al.*, 2000 a).

a) Método de *Sandermann e Kohler*

Sandermann e Kohler (1964) estudaram 99 diferentes espécies e as classificaram baseados apenas na temperatura máxima de hidratação (T₂). A classificação sugerida pelos autores separava as espécies em três classes: adequada (T₂ maior do que 60°C), intermediária (T₂ entre 50° e 60°C) e não adequada (T₂ menor do que 50°C).

A correlação linear entre temperatura máxima e resistência a compressão foi encontrada para a mistura de fibras de *Cryptomeria japonica* e três tipos de cimento, inclusive o cimento Portland (WEI *et al.*, 2003).

Vilela e Du Pasquier (1968) adaptaram a fórmula indicando o grau de compatibilidade da madeira (A) relacionando a temperatura máxima da reação com a madeira e da reação sem madeira.

$$(A) = \left(\frac{T_m - T_a}{T_M - T_a} \right) \times 100 \quad (\%)$$

ONDE: A é o grau de compatibilidade da madeira, T_m é a temperatura máxima da mistura com madeira, T_M é a temperatura máxima da reação cimento-água e T_a é a temperatura ambiente.

Os autores classificaram as espécies com valores de A acima de 80% como muito boas; com valores entre 60 e 79% como boas; entre 50 e 59% como regulares; e abaixo de 50% como ruins para a mistura com cimento. Também foi observado que o tempo para se atingir essa temperatura deveria ser no máximo o dobro do tempo alcançado pelo cimento puro, que varia entre 9 e 12 horas.

b) Método de *Weatherwax e Tarkov*

Weatherwax e Tarkow (1964) desenvolveram outra maneira de se prever o comportamento inibitório da madeira relacionando o tempo que a mistura cimento

madeira atingiria a temperatura máxima e a mesma situação para a mistura apenas de cimento e água.

$$(I) = \left(\frac{t_0 - t_s}{t_s} \right) \times 100 \quad (\%)$$

ONDE: I é o índice de inibição, t_0 é o tempo para o cimento inibido atinja a temperatura máxima de hidratação; t_s é o tempo para que o cimento não inibido atinja a temperatura máxima de hidratação

Espécies cujo o tempo para atingir a temperatura máxima é abaixo de 15 horas são consideradas prováveis materiais para bons painéis, enquanto que se o tempo superar 20 horas é recomendado pré-tratamentos para as partículas (HOFSTRAND *et al*,1984).

Por sua vez, alguns autores não encontram a correlação entre tempo para se atingir a temperatura máxima e a resistência a compressão do produto final. Um exemplo disso foi descrito por Wei *et al.* (2003) que não conseguiram encontrar essa correlação para fibras de *Cryptomeria japonica* e cimento de cura rápida, cimento Portland comum ou cimento de alto-forno.

Uma variação deste método foi sugerida por Olorunnisola (2008), sendo a inibição indicada pela razão entre o tempo da cura da mistura pelo tempo da cura do cimento. Neste tipo de medição, resultados entre 1 e 1,5 são considerados adequados, entre 1,5 e 2 são aceitáveis, ou seja, pré-tratamento é recomendado, e resultados acima de 2 são tidos como inibitórios.

c) Classificação de inibição de Wei *et al.*

Levando em consideração elementos dos métodos de Sandermann e Kohler (1964) e de Weatherwax e Tarkow (1964), Wei *et al.* (2000) classificou 38 espécies de madeira em 3 categorias de compatibilidade de acordo com a temperatura máxima (T_{\max}) e o tempo para atingi-la (t_{\max}):

- 1- Espécie de baixa inibição: $T_{\max} > 50^{\circ}\text{C}$ e $t_{\max} < 10$ horas
- 2 - Espécie de inibição moderada: $T_{\max} > 40^{\circ}\text{C}$ e $t_{\max} < 15$ horas
- 3 - Espécie de alta inibição: $T_{\max} < 40^{\circ}\text{C}$ e $t_{\max} > 15$ horas

De acordo com os autores, essa classificação mostrou correlação com os valores de MOR e ligação interna do produto final (WEI *et al.*, 2000).

d) Método do Fator- C_A

Hachmi *et al.* (1990) apontaram uma falta de consistência nos índices apresentados por Sandermann e Kohler (1964) e Weatherwax e Tarkow (1964). Eles indicaram que a classificação de uma mesma espécie pode variar de acordo com o método escolhido. Por exemplo, o *Pinus ponderosa v. scopulorum* foi classificado como compatibilidade intermediária pelo método Sandermann e Kohler, ao mesmo tempo que foi considerado altamente inibitório no método de Weatherwax e Tarkow. Há vários motivos para essa diferença. O calorímetro, as condições de hidratação e a relação madeira:cimento:água não eram constantes entre laboratórios na elaboração dos índices.

A amostra de cimento precisa de um volume ótimo de água para sua hidratação. Pouca água resultará em um material difícil de misturar e água em excesso irá diluir o cimento. Assim, é necessário se determinar esse ótimo para que as características de hidratação sejam avaliadas. Hachmi *et al.* (1990) chegaram a um valor aproximado de 0,4 para a relação água:cimento que deve ser utilizada na determinação da compatibilidade.

O gráfico da reação exotérmica do cimento nas primeiras 24 horas, também é a base para se determinar o fator- C_A , sugerido por Hachmi e Moslemi (1989). Este fator é a razão entre a área do gráfico da reação com mistura de madeira e a área do gráfico da reação do cimento com água, sem adição de madeira. Para determinação deste fator, é considerado o tempo entre 3,5 h após a mistura e 24h. Assim, a liberação inicial de calor nos primeiros 15 minutos da mistura e o estágio de dormência são ignorados, considerando apenas a cura do cimento propriamente dita. O limite máximo de 24 horas é determinado por razões práticas e considera que este período é o mais importante na cura do cimento sem inibição (HACHMI *et al.* 1990). Esta área representa a quantidade de calor liberado na reação. Quanto maior o valor do fator, menor seria a inibição apresentada pela madeira. Os autores correlacionaram este fator de inibição com os extrativos em água quente da madeira. Eles sugerem que para espécies com extrativos abaixo de 7%, podem ser divididas em 3 classes: compatíveis (fator- C_A acima de 68%), intermediárias, (68% >

fator- $C_A > 28\%$) e incompatíveis (fator- C_A abaixo de 28%) (HACHMI e MOSLEMI, 1989).

Contudo o uso do fator- C_A também gera certa controvérsia. Semple *et al* (1999) comprovaram que usando uma mesma espécie em diferentes formas, pó ou fibra, pode resultar diferentes resultados de compatibilidade. Em seu experimento com *Acacia mangium* e *Eucalyptus pellita*, eles comprovaram que ao usarem pó no teste de compatibilidade, o *E. pellita* se mostrou mais compatível com o cimento Portland do que a *A. mangium*. Contudo, quando o teste foi realizado com fibra das mesmas espécies, houve uma inversão de resultados, indicando a maior compatibilidade da acácia.

Assim, uso de pó de madeira para se determinar a compatibilidade é apto em laboratório, mas pode não ser válido em condições reais de fabricação com diferentes tamanhos de partículas. Porém o uso do pó pode fornecer informações valiosas quanto ao possível efeito máximo dos extrativos da madeira, já que quanto menor a partícula, maior a exposição de área de contato com a pasta de cimento e, por sua vez, maior a quantidade de extrativos poderá reagir na solução (KARADE *et al.*, 2003).

Outra limitação do uso do fator C_A é que ele representa o total de calor gerado, mas não indica a intensidade das reações. A intensidade da cura é importante porque o calor total pode estar distribuído pelo tempo. Por exemplo, Hachmi *et al.* (1990) indicaram que a espécie *Quercus ilex* L. apresentou um fator C_A de 37%, ou seja moderadamente compatível. Porém, ao observar sua curva de hidratação, há apenas a presença de um pico principal. A ausência de um segundo pico indica que não houve a nucleação do C-S-H, responsável pela ligação dos elementos (KARADE *et al.* 2003).

e) Método de Hofstrand *et al.* ou índice de inibição (I)

Hofstrand *et al.* (1984) aperfeiçoaram o *índice de inibição* analisando a reação exotérmica. Assim espécies diferentes podem apresentar tempo de hidratação semelhantes, porém com diferentes taxas de cura. Eles usaram o novo índice pela primeira vez para comparar a compatibilidade de 9 espécies do norte do estado americano de Idaho.

$$(I) = \left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2} \right) \times \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2} \right) \times \left(\frac{S'_2 - S_2}{S'_2} \right) \times 100 \quad (\%)$$

ONDE:

I - índice de inibição

t_2 - tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento da mistura de cimento, água e madeira (h)

t'_2 - tempo da temperatura máxima de hidratação do cimento da mistura cimento e água (h)

T'_2 - Temperatura máxima atingida para mistura cimento água ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 - Temperatura máxima atingida para cimento água e madeira ($^{\circ}\text{C}$)

$S'_2 - \Delta T'_2 / \Delta t'_2$ - Máximo incremento no período de 1 hora para mistura cimento água

$S_2 - \Delta T_2 / \Delta t_2$ - Máximo incremento no período de 1 hora para mistura cimento água madeira.

Esta nova maneira de se calcular a inibição leva em consideração três diferentes informações obtidas da curva de hidratação do cimento. Dependendo do resultado obtido por este cálculo, a espécie pode ser classificada em quatro categorias: baixa inibição ($I < 10$), inibição moderada ($10 < I < 50$), alta inibição ($50 < I < 100$) ou inibição extrema ($I > 100$) (OKINO *et al.*, 2005). Utilizando esta classificação, pode-se citar como exemplo de uma espécie de madeira de inibição extrema a *Leucaena leucocephala*. Já as espécies *Clitoria fairchildiana* e a *Euterpe edulis* são tidas como de alta inibição, enquanto que a madeira de *Eucalyptus citriodora* e de *Pinus taeda* são consideradas exemplos de espécies de baixa inibição (LATORRACA *et al.*, 1999).

Pereira *et al.* (2006) sugeriram a seguinte adaptação para o índice de inibição

$$(I^x) = (-1)^{n-1} \times \left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2} \right) \times \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2} \right) \times \left(\frac{S'_2 - S_2}{S'_2} \right) \times 10^{-4}$$

ONDE: n (1, 2 ou 3) representa o número de operações dentro dos parênteses com resultados negativos.

Se o valor de qualquer operação for negativo, significa que a amostra apresentou melhor resultado do que o cimento puro. O parâmetro $(-1)^{n-1}$ foi incluído na fórmula para caso um elemento da equação ser negativo, então o índice será negativo e indicará a melhora. Se o parâmetro não for utilizado e dois dos elementos apresentarem um valor negativo, matematicamente, eles se tornarão positivos e o índice apresentará um valor mais alto indicando uma incompatibilidade que não é real.

A desvantagem desta adaptação é que se um ou dois parâmetros forem positivos, eles tornarão o índice erroneamente mais negativo, já que os outros elementos serão negativos e serão multiplicados juntos. Para estes casos, uma nova adaptação foi sugerida pelos mesmos autores:

$$(I^+) = \left(\frac{1}{3}\right) \times \left[\left(\frac{t_2 - t'_2}{t'_2}\right) + \left(\frac{T'_2 - T_2}{T'_2}\right) + \left(\frac{S'_2 - S_2}{S'_2}\right) \right]$$

f) Determinação de resistência física

A maioria dos testes, que usa a curva de hidratação como base para se determinar a compatibilidade entre madeira e cimento, são realizados em laboratório com amostras em forma de pó. Porém, a granulometria do material pode influenciar o resultado. Karade et al (2006) estudaram diferentes granulometrias de cortiça na compatibilidade com o cimento, e encontraram que quanto menor a partícula, maior é a área superficial e, conseqüentemente, maior será a quantidade de extrativos livres na mistura.

Miller e Moslemi (1991b) também não encontraram correlação entre a resistência à tração e as propriedades da hidratação (tempo, temperatura e calor) ao estudarem o efeito isolado de elementos químicos encontrados na madeira e o cimento. Segundo eles, essa diferença é conhecida pela indústria do cimento, que acredita que a hidratação está relacionada com a taxa de formação do cimento hidratado, enquanto que a resistência é função da estrutura do cristal formado.

Conciderando o uso final dos compósitos madeira-cimento na construção civil, um teste lógico a ser aplicado para se determinar a compatibilidade é o mesmo usado para se determinar a resistência do concreto. Corpos de prova cilíndricos submetidos a ensaios de compressão transversal, após 3, 7 e 14 dias do início do processo de cura, mostraram alta correlação com a temperatura máxima de hidratação e baixa relação com o tempo para atingi-la (LEE e HONG, 1986).

Outro exemplo desta baixa correlação entre resistência e tempo pode ser encontrado na pesquisa de Vaickelionis e Vaicklioniene (2006). Eles avaliaram a resistência a compressão de cimento misturado com extrativos de cinco diferentes

tipos de madeira (0,457% do peso do cimento). Após 3 dias, a resistência das amostras foi cerca de 3,45 vezes menor do que o do cimento curado com água pura. Porém, após os 28 dias de cura, essa diferença foi reduzida para 1,82 vezes menor.

Para comprovar a baixa correlação entre a resistência final do produto e a fase inicial da hidratação, Blankenhorn *et al.* (1994) compararam a resistência a compressão de um compósito feito de *Pinus taeda*, espécie conhecida por apresentar baixa inibição na fase inicial da cura, com compósitos de quatro espécies tropicais. Após 7 dias, o tratamento de *Pinus taeda* obteve valor superior a todos os demais. O mesmo teste aplicado após 14 dias mostrou que três das quatro espécies tropicais (*Acer saccharum*, *Populus tremuloides* e *Acer rubrum*) já apresentaram valores de compressão superior ao do *Pinus taeda*. A quarta espécie (*Quercus rubra*) foi a que mais demorou, mas apresentou maior resistência do que a conífera após 58 dias. Sendo que o valor foi crescente de acordo com o passar do tempo para todas as espécies.

De acordo com a norma brasileira, os corpos de prova cilíndricos devem ter a altura igual ao dobro do diâmetro. O diâmetro deve ser de 10, 15, 20, 25, 30 ou 45 cm, sendo que as bordas circulares extremas do molde devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal do molde. O molde deve ser feito de um material que não reaja com o cimento Portland e que permita a fácil desmoldagem. O corpo de prova deve permanecer no molde e protegido das intempéries por 24 horas após produção e depois mantidos em câmara úmida à temperatura de 23°C e umidade relativa superior a 95% (NBR 5738, 2008). A norma americana recomenda que os corpos de prova devem ser ensaiados após 24 h e 3, 7, 28 e 90 dias. A carga aplicada deve ser de 0,25 MPa/s (ASTM C 39/ C39M-04, 2004).

No caso da ocorrência de incompatibilidade química entre o cimento e a madeira, a tensão de ruptura é muito baixa (inferior a 1,0 MPa). Sendo que o valor aceito pelas empresas de construção civil é acima de 4,0 MPa. Porém para este método, o valor não depende apenas da natureza dos materiais misturados, mas também da razão entre eles. Dosagens muito elevadas do aglomerante podem mascarar o efeito nocivo à sua pega (BERALDO e CARVALHO, 2004).

Silva et al (2002) sugeriram um índice baseado na relação entre a resistência à compressão axial dos corpos de prova com biomassa e a resistência da testemunha, apenas cimento. Valores abaixo de 10% indicam que a biomassa não

tem aptidão para o uso em compósitos de madeira-cimento. Por sua vez, valores acima de 65% indicam materiais vegetais compatíveis com o cimento.

2.4 . ELEMENTOS QUÍMICOS DA MADEIRA QUE CAUSAM INIBIÇÃO

Madeira é principalmente composta por três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, em uma proporção aproximada de 2:1:1. Estes constituintes somam cerca de 95% da madeira seca. Como celulose e hemicelulose são polissacarídeos, os carboidratos formam 70% da madeira, enquanto que o polímero polifenólicos, lignina, formam de 20 a 30%, dependendo da espécie. Os extrativos da madeira, embora não sejam elementos estruturais, são responsáveis por uma importante fração da biomassa que pode variar entre 1 a 10% da madeira (YOUNG, 2008).

De acordo com pesquisas citadas por Biblis e Lo (1968), dos componentes orgânicos na madeira, os carboidratos são os que têm maior influência negativa na cura do cimento, sendo a glicose e a celulose os considerados mais inibitórios. Dentre os grupos fenólicos, a lignina e os terpenos não apresentam capacidade inibitória, porém o tanino, especialmente os hidrolisados, tem grande importância na inibição da pega do cimento, assim como os ácidos orgânicos de peso molecular alto, como os ácidos alifáticos.

Vaickelionis e Vaicklioniene (2003), através de suas análises por raio-X da influência de cinco espécies lituanas (*Alnus* sp, *Betula* sp, *Carpinus* sp, *Populus* sp e *Abies* sp) na cura do cimento, observaram que o resultado foi semelhante para todas as espécies, apenas com pequenas diferenças de intensidades dos picos. Assim concluíram que a hidratação depende mais da quantidade de extrativos do que de sua composição química.

Contudo, a maioria dos outros trabalhos realizados neste campo da ciência indica o contrário: tanto a natureza quanto a quantidade dos componentes químicos da madeira afetam a cura do cimento. Tipicamente os componentes inibitórios podem ser divididos em dois grupos. O primeiro é composto por carboidratos de sacarose e o segundo de componentes fenólicos com compostos de catecol ($C_6H_4(OH)_2$) (YASUDA *et al.*, 2002).

Karade *et al.* (2006) estudaram a compatibilidade entre a cortiça, extraída da casca de *Quercus occidentalis*, e o cimento. Além dos extrativos do material, eles

também mediram e analisaram a composição do teor de cinzas que indicou uma considerável presença de impurezas inorgânicas. Estes elementos contaminantes podem ser resultado da manipulação durante a colheita e/ou geração de partículas. Entre os elementos encontrados, havia cálcio e potássio, do qual os componentes óxidos podem afetar a fase inicial da hidratação do cimento. A presença de sílica também pode resultar em reações pozolânicas com o cimento.

Miller e Moslemi (1991b) estudaram a reação de inibição do cimento em relação a 10 diferentes elementos isolados que normalmente estão presentes na madeira: ácido acético, celulose, esterol, ácido graxo, terpeno, lignina, ácido abiético (resina), glicose, hemicelulose e tanino. Entre os resultados, eles apontaram que celulose, lignina, ácido graxo, resina, esterol e terpeno em concentração menor do que 1% da mistura não afeta a resistência do produto final. O principal causador da inibição foi a glicose, reduzindo cerca de 40% da resistência à tração. Em menor grau de inibição, a hemicelulose, tanino e ácido acético também afetaram esta característica. Já as propriedades de hidratação foram afetadas pela glicose, tanino e hemicelulose, sendo os dois últimos os que apresentaram maior efeito.

2.4.1. Extrativos

O termo extrativo é usado para descrever inúmeros componentes que podem ser extraídos com solventes polares e não polares. Os extrativos são constituintes não-estruturais e podem ser divididos em três categorias principais. 1- Terpenóides e esteróides; 2- Gorduras e graxas; e 3 - Componentes fenólicos. (YOUNG, 2008). Tanto a natureza quanto a quantidade de extrativos são importantes na utilização da madeira. A quantidade de extrativos pode variar de 1 a 20% dependendo da espécie e posição dentro da árvore. Algumas vezes os efeitos dos extrativos na utilização da madeira podem ser grandes em relação a sua baixa quantidade. A quantidade de extrativos, ou resina, geralmente se refere aos componentes extraíveis em solvente orgânico. Contudo, tecnicamente, extrativos incluem resinas que são solúveis em solvente orgânico e carboidratos que são solúveis em água. Quando a extração total é necessária, normalmente se usa solventes como o metanol seguido por uma extração aquosa. Os tipos de componentes isolados depende basicamente da polaridade do solvente usado na extração (WALKER, 2006).

a) Açúcares

Os açúcares podem ser divididos em dois grupos: redutores e não-redutores. Os açúcares redutores são aqueles que possuem grupos aldeídos e cetonas livres na cadeia, por isso são capazes de sofrer oxidação. Entre eles pode-se citar a glicose, lactose, maltose e celobiose. Já os não-redutores possuem os grupamentos interligados e tornam-se redutores somente após sofrer hidrólise. São considerados não-redutores a sacarose, α -metil glicosídeo, rafinose e α , α -trealose (THOMAS; BIRCHALL, 1983).

Os açúcares não-redutores que apresentam 5 anéis, sacarose e rafinose, são os maiores inibidores da cura do cimento. Embora em menor grau, os açúcares redutores (glicose, lactose, maltose e celobiose) também apresentaram poder inibidor, ao contrário dos não-redutores α -metil glicosídeo e trealose, que não retardam a cura do cimento. Essa diferença de inibição pode ser explicada pelo fato de que açúcares redutores reagem facilmente em meio alcalino se degradando e rapidamente unindo-se ao cálcio. Já os não-redutores são inertes em solução alcalina, a não ser que sejam não-redutores de 5 anéis, que possuem uma capacidade intermediária de formar sais com Ca^{2+} e OH^- , mas com estabilidade suficiente para não se degradar (THOMAS; BIRCHALL, 1983). Após imersão em solução alcalina, pode se observar que açúcares redutores (glicose, lactose, maltose e celobiose) apresentam uma solução amarelada em relação aos não-redutores (sacarose e rafinose). Essa coloração comprova a alta degradação dos açúcares redutores neste tipo de meio. Análise por ultra-violeta indica formação de ácidos sacáricos ou a enolização dos açúcares redutores (POURCHEZ *et al.*, 2006).

Análise da fase aquosa da hidratação do cimento apontou um aumento na concentração de Ca^{2+} , OH^- , Si, Al e Fe quando misturados com açúcares. Este aumento está diretamente ligado ao efeito inibidor (THOMAS; BIRCHALL, 1983). A capacidade de ligação dos açúcares com o cálcio pode ser comprovada pelo seguinte teste: açúcares são misturados em uma solução de hidróxido de cálcio (6 gramas por litro de água) e após 48 horas, a concentração de Ca^{2+} é determinada por cromatografia. Pourchez *et al.* (2006) confirmaram assim a alta capacidade de ligação com cálcio dos açúcares: sacarose, rafinose, glicose, maltose, celobiose e lactose.

Uma vez que os açúcares possuem apenas uma capacidade moderada de complexação de cálcio e não possui nenhuma interatividade detectável com silicatos, presume-se que a inibição da precipitação de C-S-H ocorre pelos processos de absorção e nucleação (THOMAS; BIRCHALL, 1983).

Previte e Grace (1971) também estudaram o efeito inibidor na cura do cimento Portland dos monossacarídeos (glicose, frutose, arabinose, xilose e ribose) e dos dissacarídeos (maltose, lactose e celobiose), além dos açúcares que não se degradam em meio alcalino, o dissacarídeo sacarose e o trissacarídeo rafinose. Eles observaram que o peso molecular dos açúcares é um dos fatores que afeta a hidratação do cimento, mas não o único, já que há diferença de inibição entre sacarídeos de peso molecular equivalente, como por exemplo, maltose (degradável em meio alcalino) e sacarose (não degradável). Contudo, também foi observada diferença entre inibição entre a glicose e a frutose, sendo que ambas possuem peso semelhante e são degradáveis em meio alcalino. Considerando que a frutose se degrada com mais facilidade do que a glicose, uma nova variável deve ser levada em consideração na determinação do potencial de inibição de um açúcar: a taxa de degradação em meio alcalino.

Outra questão importante a ser considerada quanto ao efeito de açúcares na mistura com o cimento é o fato de que, sob condições alcalinas, alguns sacarídeos, além de sofrerem degradação podem ainda se rearranjar. Por exemplo, se a glicose for submetida a um meio de hidróxido de cálcio por alguns dias, no final haverá uma mistura de 63,5% de glicose, 2,5% de manose, 31% de frutose e 3% de outras substâncias. A exposição prévia de açúcares ao meio alcalino antes de misturar ao cimento propriamente dito, reduziu o efeito inibidor na maioria dos açúcares solúveis em meios alcalinos. O tempo de exposição também afeta a redução da inibição, porém a maior efeito ocorre logo nos primeiros minutos (PREVITE; GRACE, 1971).

Juenger e Jennings (2002) estudaram a adição de açúcar de cozinha na mistura de cimento e água. Eles observaram que a adição de 1% de açúcar chega a atrasar a hidratação do cimento em até 3 meses a uma temperatura de 20°C. Porém, ao aumentar a temperatura da cura, o período de inibição diminui. Outra observação pertinente foi que a mistura contendo açúcar retarda a hidratação, contudo uma vez que a reação ocorre, ela é mais eficiente do que a do cimento puro. Ou seja, após 10 dias depois da mistura, o tratamento com açúcar tem maior grau de hidratação do que o puro.

Este período inicial de inibição que termina repentinamente é chamado de "barreira de inibição". A barreira pode ser quebrada quando o número de sítios de nucleação é maior do que o de açúcar presente, então os sítios futuros não são contaminados. O maior grau de hidratação após a quebra da barreira pode ser causado pelo excesso de íons na solução que podem hidratar nos cristais já formados. Sendo que o crescimento de cristais heterogêneos exigem menos energia do que os homogêneos, por isso a formação é mais rápida. As propriedades dos cristais de C-S-H também são afetadas pelo açúcar. Cristais formados após o período de inibição tem a tendência de serem menos densos e com maior área superficial (JUENGER; JENNINGS, 2002).

Marzuki *et al.* (2011) citam os trabalhos de Simatupang (1985) e Weber (1985) que postulam que a quantidade de açúcares acima de uma proporção média entre 0,5 a 0,8% inibem a cura do cimento. Contudo, os mesmos autores indicam que nas indústrias de painéis madeira-cimento na Malásia a quantidade de açúcar na madeira é reduzida naturalmente pelo armazenamento ou extração com água.

2.4.2 . Polissacarídeos

Aproximadamente dois terços da madeira são compostos de polissacarídeos (celulose e várias hemiceluloses). Uma estimativa do total de polissacarídeos pode ser obtida ao submeter a madeira livre de extrativos a deslignificação por oxidação (geralmente com hidróxido de sódio), que resulta em um resíduo sólido composto de material polissacarídeo (holocelulose) (SJOSTROM; WESTERMARK, 1999)

A capacidade de inibição dos polissacarídeos está relacionada na diminuição da taxa de crescimento dos cristais, que culmina na precipitação do hidróxido de cálcio. Por exemplo, a concentração de éteres de amido é inversamente proporcional a taxa de crescimento. Isso indica que o balanço entre a solubilização de partículas anídricas e a precipitação dos elementos hidratados é alterada quando se adiciona amido na solução. Por outro lado, se a mistura do amido for atrasada entre 30 e 90 minutos, dependendo da concentração, seu efeito passa a ser desprezível (PESCHARD *et al.*, 2006).

A teoria da absorção das moléculas orgânicas nas partículas anídricas não é válida no caso de cimento misturado com polissacarídeos. Esta afirmação pode ser

feita ao observar que diferentes proporções (de 0,5 a 200%) de dextrina, um polissacarídeo de baixo peso molecular obtido através da hidrólise ácida do amido, não afetou a taxa de solubilidade do cimento. Estudos complementares sobre a quantidade de Ca^{2+} e SO_4^{2-} disponível durante a hidratação do cimento com polissacarídeos mostram que a mistura não afeta a fase de nucleação do CSH e nem a formação de etringita. Porém, a conversão de etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) para mono-sulfato pode ser atrasada (PESCHARD *et al.*, 2006).

Wei *et al.* (2002) estudaram a compatibilidade do cimento com fibras de madeira de *Cryptomeria japonica* obtidas pelo método de explosão por vapor de água. Neste processo a madeira é submetida a alta temperatura e alta pressão por um período curto e descompressão repentina para a obtenção das fibras. O processo acaba degradando os polissacarídeos presentes na madeira, e por sua vez, apresentam uma maior inibição à cura do cimento.

a) Celulose

Imagens de MEV de compósitos de cimento com reforço de fibras de celulose mostraram a presença de produtos da hidratação do cimento (etringita e hidróxido de cálcio) no lúmen das fibras. Este fator é conhecido como a mineralização da celulose. Isso leva a um aumento na adesão entre o material orgânico e inorgânico. Por outro lado, a mineralização das fibras leva a seu enfraquecimento, o que compromete as propriedades do compósito a longo prazo (TONOLI *et al.*, 2009).

Éteres de celulose não possuem capacidade elevada de ligação com o cálcio. Já em relação a degradação da celulose em meio alcalino, esta mostrou-se mais estável do que açúcares redutores. Embora em baixa concentração, cinco são os produtos da degradação mais importantes: três ácidos hidroxí-carboxílicos (ácido láctico, glicólico e oxalíco) e dois alcoóis (glicerol e dietil-glicol). Os ácidos são identificados como produtos da degradação da celulose em meio alcalino. Já os alcoóis, em concentração dez vezes menor do que a dos ácidos, são tidos como resultado da síntese de produtos secundários. E embora a celulose apresente um efeito inibidor na cura do cimento, seus produtos da degradação em meio alcalino mostraram-se desprezíveis na hidratação do cimento, ao contrário do que ocorre nos açúcares (POURCHEZ *et al.*, 2006). A mistura de éteres de celulose também não

mostrou inibição na formação dos cristais de etringita e hidróxido de cálcio (PESCHARD *et al.*, 2004).

b) Hemicelulose

O uso de um isolado de hemicelulose exibiu uma completa inibição da cura do cimento. A temperatura da reação manteve-se constante durante as 30 horas avaliadas (BILBA *et al.*, 2003). A decomposição da hemicelulose também foi um dos principais fatores na inibição da cura do cimento por fibras de *Cryptomeria japonica*. Isso porque a degradação da hemicelulose forma frações de baixo peso molecular e solúveis em água como por exemplo açúcares hemicelulosicos (WEI *et al.*, 2002).

2.4.3 . Lignina

Análise da degradação térmica da mistura de cimento com um isolado de lignina não apresentou o pico por volta de 500°C. Este pico está relacionado com a desidratação da fase $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (BILBA *et al.*, 2003). Este experimento confirma a teoria de Biblis e Lo (1968) que defendiam que a lignina não é um fator da madeira que inibe o cimento.

2.5. PRÉ-TRATAMENTOS: MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

Extrativos é um termo geral que compreende toda uma gama de materiais orgânicos solúveis em água e solventes que podem ser extraídos por procedimentos simples (YOUNG, 2008). A solubilidade da madeira em vários solventes é a medida da quantidade de extrativos. Não existe um solvente único que possa retirar todos os extrativos da madeira. Éter é relativamente não-polar e, por isso, capaz de extrair ácidos graxos, resinas, óleos, esteróides e terpenos. Etanol/benzeno é mais polar e extrae a maioria dos extrativos solúveis em éter e mais os componentes orgânicos não solúveis em água. Água quente extrai alguns sais inorgânicos e polissacarídeos de baixo peso molecular, como açúcares e amido. Água também remove certas hemiceluloses como a arabinogalactose (PETTERSEN, 1984).

A extração pode ocorrer com substâncias polares ou apolares. Pereira *et al.*, (2006) testaram o efeito da madeira de *Pinus* sp na curva de hidratação inicial do cimento antes e depois de diversos métodos de extração. Os autores observaram que não houve diferença significativa entre a inibição da madeira *in natura* ou após extração com substâncias apolares, como etanol e éter etílico.

2.5.1. Método de extração: Água fria

Govin *et al.*, (2005) estudaram a madeira de *Populus hybrid* e observaram uma perda de massa de 2,15% ao usar o método de extração com água por um tempo de 1 a 24 horas. O valor encontrado foi constante, ou seja, não foi afetado pelo tempo de imersão. Esta porcentagem é a quantidade de extrativos solúveis presentes nesta espécie. Eles usaram o método de condutividade elétrica para confirmar o efeito da água com extrativos na cura do cimento. Eles observaram que formação do mineral $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sofreu um atraso de 1,8 horas e confirmaram que o tempo de imersão não afeta a curva.

A solução resultante de uma imersão em água de madeira de *Populus hybrid* por 1 hora consistia em vários ácidos carboxílicos com baixa concentração (< 1 mg/l), com exceção dos ácidos fórmico, acético, málico, benzóico e *p*-salicílico (GOVIN *et al.*, 2005). Outro estudo também realizado com extrativos de madeira de *Populus* sp. em água fria mostrou que o único pico presente na análise de cromatografia foi o relativo ao ácido acético. Embora o extrativo tenha afetado negativamente a hidratação do C-S-H, o ácido acético isolado não reproduziu este resultado. O que leva a crer que o elemento inibidor não pode ser detectado no teste (BOUSTINGORRY *et al.*, 2005).

A extração com água removeu 85% dos extrativos retardantes da cura do gesso da *Hevea brasiliensis*. O extrativo era uma mistura de aminoácidos (glutamina, arginina, alanina e asparagina) com concentração estimada em 1% (SIMATUPANG *et al.*, 1992). Outra pesquisa também analisou o efeito inibidor da madeira na cura do gesso. Cinquenta e duas espécies de madeira tropical tiveram seus elementos inibitórios extraídos com água. Destas espécies, 5 apresentaram inibição extremamente forte e outras 10 foram consideradas com forte poder inibitório. Dentre os extrativos prováveis de inibir a cura do gesso, foram apontados

os compostos fenólicos, entre eles os taninos e aminoácidos hidrolisáveis. Também não foi possível encontrar uma correlação entre o pH da madeira e seu efeito inibidor neste caso (KASIM; SIMATUPANG, 1989).

2.5.2 . Método de extração: Água quente

Os extrativos solúveis em água quente são apontados como um dos principais inibidores do cimento. Entre esses extrativos pode-se destacar a presença dos taninos hidrolisados, compostos por açúcares e ácidos gálico e elágico. Esses extrativos reagem com os íons de hidróxido de cálcio do cimento levando a inibição de sua cura. A quantidade presente na madeira também é considerada um fator limitante no critério de inibição. Madeiras que apresentam uma quantidade de extrativos em água quente acima de 7% normalmente são consideradas inaptas para a mistura com o cimento (HACHMI; MOSLEMI, 1989)

A temperatura da água utilizada no processo pode afetar o tipo de elemento inibidor extraído. Por exemplo, os extrativos retirados pelo método de água quente de *Populus simonii* da China apresentaram uma inibição consideravelmente maior do que os extraídos de água fria (fator C_A de 26,8 para água quente e 72 para água fria) (WANG; YU, 2012).

Por outro lado, a lavagem de partículas de *Eucalyptus grandis* com água quente não apresentou efeito significativo sobre a resistência à compressão axial, dispensando assim este método de extração para essa espécie (BERALDO; CARVALHO, 2004). Também não houve melhoras na resistência para as espécies *Acer saccharum* e *Quercus rubra*, na verdade, valores de resistência à compressão diminuíram a medida que a porcentagem de perda de peso da madeira aumentou devido ao método de extração com água quente (BLANKENHORN *et al.*, 1994).

A extração de componentes solúveis em água quente é mais eficiente no combate a inibição à cura do cimento pela madeira do cerne de *Pinus sp.* do que no alburno. Sem tratamento, o cerne é mais inibidor do que o alburno por apresentar maior quantidade de açúcar. O concentrado da extração pode inibir completamente a cura do cimento por até 66 horas (BIBLIS; LO, 1968).

2.5.3. Método de extração: Acetona

Simatupang *et al.* (1992) estudaram o efeito inibitório dos extrativos da seringueira (*Hevea brasiliensis*) na produção de aglomerados ligados com gesso. Em seus resultados, apontaram que a acetona removeu apenas uma pequena parte (cerca de 5%) dos retardantes da cura do adesivo inorgânico. Dentre os componentes solúveis em acetona, a fração lipossolúvel continha traços de retardantes do gesso. Sendo estes encontrados em elementos neutros e ácidos livres. Na seringueira, os ácidos graxos, livres e estratificados, são basicamente ácidos palmitico, oleico e linolênico. A porcentagem de ácido graxo saturado nos ácidos livres foi maior do que na parte neutra.

2.5.4 . Método de extração: Solução alcalina

Simatupang (1989) verificou que a fração de extrativos solúveis em meio alcalino possuem influência adicional na cura do cimento. O aumento de componentes solúveis em meios alcalinos diminui o valor de compressão do produto. Madeiras deterioradas por fungos, luz e calor contém níveis mais altos de frações alcalino-solúveis.

A imersão da madeira em uma solução calcária também foi testada para estudar o efeito na inibição da madeira no cimento. A madeira de *Populus hybrid* submersa em tal substância por um período de 1 a 24 horas sofreu uma perda de massa entre 2,2 e 3,9%. Quanto maior o tempo de imersão, maior foi a perda de massa. Quando se usa a solução calcária ao invés da água, ocorre, além da retirada dos extrativos, há degradação alcalina de produtos. Pelo teste da condutividade elétrica, a madeira alcalina mudou significativamente o comportamento da hidratação da mistura. Comparado com o cimento puro, o pico de condutividade foi atrasado entre 9,6 a 13,8 horas, dependendo do tempo de imersão da madeira. Assim, pode-se observar que produtos degradados causam mais inibição à hidratação do cimento do que os extrativos (GOVIN *et al.*, 2005)

A extração em solução de CaO também foi maior do que a em água para fibras de coco e de sisal (*Agave sisalana*), isso porque neste meio, a decomposição da hemicelulose e lignina é mais rápida. A taxa de extração também diminuiu com o

tempo, embora ainda fosse presente mesmo após 30 dias. Análise química indicou a presença de carboidratos, aldeídos e hidroxilas nos extrativos de ambos tipos de fibra. A estrutura das fibras e da madeira são semelhantes, sendo a maior diferença a quantidade e composição da lignina e da hemicelulose. No caso da fibra, estes elementos estão na maioria na lamela média e por isso são mais fáceis de ser removidos, e conseqüentemente, são a maior parte dos extrativos (AGGARWAL; SINGH, 1990).

Para entender como a madeira alcalina afeta a hidratação do cimento, é importante observar as mudanças químicas da madeira após imersão. Para *Populus hybrid*, a imersão em solução alcalina não afetou a lignina Klason ou a solúvel em ácido. O efeito do meio alcalino aumenta os carboidratos, exceto pela quantidade de celobiose que é constante. Por ser uma folhosa, não apresentou quantidade significativa de arabinose e galactose. A média de xilose diminuiu em quase 2% após imersão em solução calcária. Este açúcar, sendo o representante da glicuronoxilana na espécie, indica que a hemicelulose foi hidrolisada em condições alcalinas. E isso também pode ser confirmado pela diminuição de manose e glicose, representante dos glucomananos. Por outro lado a quantidade de celulose cristalina aumentou neste tipo de tratamento (GOVIN *et al.*, 2005).

Resultado semelhante foi encontrado ao se estudar cinco diferentes espécies de madeiras lituanas. Pesquisadores observaram que a madeira em forma de pó se diluiu de 5 a 10 vezes mais em solução alcalina do que em água. A explicação para esse fenômeno foi que sob a influência de Ca(OH)_2 , a hemicelulose sofreu degradação e tornou-se um açúcar solúvel (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2003)

2.5.5 . Método de extração: Metanol

Alnus japonica é uma espécie nativa do Japão, nordeste da China e Coréia e conhecida pelo seu efeito inibitório na cura do cimento. Os componentes inibitórios desta madeira foram separados utilizando inicialmente a extração por metanol e na seqüência com *n*-hexano, benzeno, acetato de etilo, metanol e 75% de metanol. Isso porque as polaridades destas soluções são diferente, por conseqüência a solução extraída por cada processo também foi diferente. Porém, apenas a extração com

metanol apresentou uma quantidade significativa de componentes inibitórios. Como este solvente é polar, concluiu-se que os extrativos que inibem a cura do cimento possuem alta polaridade. A identificação destes elementos mostrou que os extrativos com mais poder de inibição são as glicoses e sacaroses. Porém se a quantidade dos elementos inibitórios for abaixo de 1% na madeira, há baixa inibição da cura do cimento (YASUDA *et al.*, 2002).

Um processo semelhante foi utilizado para se isolar os elementos inibidores de outra espécie japonesa conhecida por sua baixa compatibilidade com o cimento, a *Zelkova serrata* Makino. Os resultados foram semelhantes aos encontrados para a *Alnus japonica*. Os extrativos que inibem a cura do cimento também apresentaram alta polaridade e também não afetaram a cura quando em porcentagens abaixo de 1%. A análise da estrutura química do material isolado indica que tanto o C-glicosídeo com quatro grupos hidroxila e a cetona α -hidroxilada encontradas na região alifática da molécula podem se ligar aos íons inorgânicos e contribuir para a inibição da cura do cimento (MATSUSHITA *et al.*, 2003).

Inclusive a baixa concentração de elementos tidos como inibitórios como glicose e tanino já foi apontada como um acelerador na cura do cimento. A cura de cimento Portland com plastificante a 80°C foi acelerada com a mistura de 0,27, 0,55 e 1,09% de glicose, e em menor intensidade com a mistura de 0,3, 0,6 e 1,2% de tanino hidrolisado (SIMATUPANG, 1990).

2.6. ADITIVOS QUÍMICOS

O uso de aditivos químicos na produção de painéis madeira-cimento apresenta um princípio diferente dos procedimentos de extração de substâncias inibidoras presentes na madeira. Aditivos químicos agem como aceleradores da pega do cimento. O uso de aditivos químicos para este fim varia tanto em formulação quanto em concentração.

Aditivos químicos podem ser classificados em dois tipos de acordo com o padrão da curva exotérmica das 24 horas iniciais da pega do painel madeira-cimento. Os aditivos do tipo I são aqueles em que a curva de hidratação apresenta dois picos, semelhantes à curva de hidratação do cimento puro. Já os aditivos do tipo II são aqueles que apresentam apenas um pico exotérmico, a reação atinge

uma temperatura máxima rapidamente, mas diminui durante o resto do período. Porém a classificação do tipo de aditivo é dependente da espécie usada na mistura. Ou seja, cada fórmula de aditivo pode ser considerada tipo I para uma espécie de madeira e tipo II para outra (WEI *et al.*, 2000 b).

Pereira *et al.* (2012) compararam as propriedades de painéis madeira-cimento produzidos com duas espécies (*Pinus pinaster* e *Eucalyptus globulus*) com e sem adição de 2% de cloreto de cálcio. Para as duas espécies, o uso do cloreto mostrou-se benéfico tanto para as propriedades físicas quanto mecânicas.

Porém os benefícios do cloreto nas propriedades mecânicas dos painéis são relativos e dependem do tipo e estado da madeira. Por exemplo, Huang (1999) estudou a produção de painéis madeira-cimento com partículas de *Pinus resinosa* tratada com CCA. O uso de 3% CaCl_2 reduziu o índice de inibição da espécie de 30,70 para 8,74. Porém essa melhoria não foi refletida para as propriedades mecânicas do painel produzido. Sendo que a adição de 5% de CaCl_2 resultou em painéis com valores de ligação interna e MOR menores do que do painel de controle.

Semple e Evans (2002) estudaram o efeito de 137 substâncias como aditivo químico para a diminuição do efeito de inibição que a madeira da *Acacia mangium* causa na pega do cimento. Entre as substâncias, foram testados cloretos, sulfatos, nitratos, acetatos, óxidos, carbonatos e fluoreto dos cátions Al, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr e Zn. Os autores encontraram diversas substâncias mais eficientes do que o CaCl_2 , que é o aditivo mais conhecido e usado como acelerador da pega do cimento, como por exemplo SnCl_4 , AlCl_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ e FeCl_3 . Estas substâncias possuem cátions que formam quelatos insolúveis ao reagirem com o extrato alcalino da madeira, diminuindo seu efeito inibidor.

Badejo *et al.* (2011) testaram o uso de cloreto de alumínio na produção de painéis com serragem de 8 espécies tropicais da Nigéria e cimento. Foi observado uma relação direta entre a melhora das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos e o aumento da quantidade de cloreto usado de 1 a 3% da massa do cimento.

Matoski *et al.* (2013) estudaram a influência do uso de dois tipos de cloreto (CaCl_2 e MgCl_2) e de dois outros tipos de aceleradores (Na_2SiO_3 e Al_2SO_4) nas propriedades de compósitos madeira-cimento produzidos com pó de *Pinus* sp e cimento Portland tipo V ARI. A adição de cloreto, independente do tipo, resultou em

compósitos com melhores propriedades físicas e mecânicas. Dentre os demais aceleradores, o Al_2SO_4 foi melhor do que o Na_2SiO_3 .

A eficiência de diferentes tipos de cloretos é razão de sua reação inicial com o C_3A presente no cimento formando hidrocloroaluminato de cálcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), que é mais solúvel em água do que o C-S-H, resultando em um primeiro pico exotérmico. Alguns cloretos, como o CaCl_2 , ainda aumentam a presença de alcalinos dissolvidos no cimento, assim há uma precipitação de sulfoaluminato de cálcio, acompanhado de cloro-aluminato resultando em um aumento de temperatura observado no segundo pico (WEI *et al.*, 2000 b).

2.7. FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO

2.7.1. Relação madeira:cimento

Comercialmente a relação da quantidade de madeira:cimento dos painéis incorporam 1 parte de madeira para 2,75 a 3,0 partes de cimento, com base no peso. Embora o preço de mercado por quilo do cimento seja inferior ao da madeira, ao ser utilizado tais relações, devido a maior quantidade, o cimento pode vir a tornar-se a parte mais cara do processo (SIMATUPANG, 1989). A grande quantidade de cimento também é responsável por chapas mais pesadas, que resultam no aumento do custo de transporte e manuseio (MOSLEMI; PFISTER, 1987). Prestemon (1976) estudou painéis de lascas de madeira, serragem e cimento e indicou um aumento na resistência mecânica de acordo com o aumento da quantidade de cimento na relação madeira:cimento (de 1:0,75 e 1:1 para 1:1,5).

Segundo Lee (1985), para painéis produzidos com partículas tipo excelsior de *Pinus taeda* e cimento, a relação ideal para se atingir valores máximos para as propriedades estruturais seria 2 partes de cimento para 1 de madeira. Se uma relação menor for usada, a madeira não é recoberta suficientemente pelo cimento e resulta em uma baixa ligação interna. Por outro lado, se a relação for maior, aumentando a quantidade de cimento, a taxa de compactação será reduzida resultando em uma baixa flexão estática.

Simatupang (1979) encontrou uma correlação linear entre a razão cimento/madeira e a resistência à flexão. A madeira usada na pesquisa foi *Picea* sp e o cimento PZ 45 F, e relação madeira:cimento variou de 1:1,5 para 1:3,5.

Marzuki *et al.* (2011) analisaram o efeito de quatro diferentes proporção de madeira de *Leucaena leucocephala* e cimento (1:1,75; 1:2; 1:2,25; e 1:2,5) nas propriedades físicas e mecânicas de painéis com massa específica nominal de 1,3 g/cm³. Eles concluíram que a maior quantidade de cimento tende a diminuir os valores médios de inchamento em espessura e aumentar os valores médios de absorção de água. Os melhores valores médios encontrados para a propriedade de MOR ocorreram em painéis que utilizaram a relação madeira:cimento de 1:1,75. Porém, o MOE apresentou comportamento oposto, sendo seus melhores resultados obtidos na relação 1:2,5. Os maiores valores médios para a ligação interna foram observados nos painéis produzidos com a relação 1:2.

Ashori *et al.* (2012) estudaram o efeito da quantidade de madeira de *Populus deltoides* nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos madeira-cimento. As propriedades de MOR e MOE melhoraram com o aumento da quantidade de madeira de 30% para 40%, porém, o aumento para 60% reduziu os valores médios encontrados para estas propriedades. Porém a ligação interna teve seu valor máximo com a mistura de 30% de madeira. A propriedade de ligação interna apresenta uma correlação negativa com a proporção de madeira presente na mistura porque a maior quantidade de partículas acarreta em mais pontos de ligações entre madeira e madeira em detrimento das áreas de conectividade entre madeira e o material aglutinante, no caso, o cimento. Contudo a propriedade de resistência ao impacto apresentou uma correlação direta com o aumento de madeira na mistura, uma vez que a madeira possui uma capacidade maior de absorver e dissipar a energia do impacto do que o cimento.

2.7.2. Quantidade de água

Simatupang (1979) estudou o efeito da quantidade de água (variando entre 25 e 75% do peso seco do cimento usado) em painéis de madeira-cimento usando *Picea* sp. O autor concluiu que a quantidade de água ideal para o compósito depende da relação madeira:cimento. Em uma relação 1: 3,5, o valor médio máximo

para resistência à flexão foi para misturas com adição de 35% de água. Se essa relação baixar para 1:3, 1:2,5 ou 1:2, a resistência é maior para a proporção de 45% de água. Já uma relação 1:1,5 necessita de mais água e atinge melhores resultados com 55%.

A relação água e cimento também depende da geometria das partículas de madeira. Partículas menores e mais finas possuem uma maior área superficial e, por consequência, uma maior superfície de absorção de água. É importante ressaltar que excesso de água é menos prejudicial à mistura do que sua falta. Assim, na fabricação de painéis madeira-cimento, pode-se acrescentar uma quantidade extra de água sem risco (SIMATUPANG, 1979).

Outra questão prática para indústrias deste tipo de painéis é o fato de que as partículas de madeira não precisam ser secas antes de serem usadas nas misturas com o cimento. No processo de prensagem, a água presente na madeira sai dos poros e reage com o cimento. Por isso, Simatupang, 1979, considerou o ponto de saturação das fibras médio da madeira (30%) para sugerir uma fórmula para calcular a quantidade de água necessária em uma mistura madeira-cimento.

$$H_2O = (C \times 0,35) + (M \times (0,3 - TU\%)) \quad (g)$$

SENDO: C o peso do cimento (g), M o peso das partículas (g) e TU% o teor de umidade das partículas.

Por se tratar de uma fórmula geral, foi considerado a relação de água-cimento efetiva (35%) ao invés da relação água-cimento total, uma vez que essa relação depende da relação madeira-cimento. Na relação total, a quantidade de água considera toda a água livre e a absorvida pelos agregados, enquanto que a relação efetiva leva em consideração apenas a água que reage com o cimento. Assim, concretos mais porosos exigem uma quantidade de água total maior do que concretos densos, embora ambos utilizem basicamente a mesma quantidade de água efetiva. Por exemplo, na pesquisa de Simatupang (1979), tanto os painéis que usaram uma relação madeira:cimento de 1:1,5, quanto de 1:3, apresentaram uma mesma razão de água efetiva de 35%, diferente das proporções de água total, 55 e 45% respectivamente.

2.7.3 . Dimensões das partículas

As dimensões das partículas contribuem com o grau de ligação entre a madeira e o cimento. Esta interação reflete diretamente na resistência à flexão do painel madeira-cimento (OLORUNNISOLA, 2009). Painéis madeira-cimento produzidos com partículas mais longas de madeira de espécies tropicais apresentam, melhor estabilidade dimensional em relação a absorção de água, inchamento de espessura e maiores valores de MOR e MOE (BADEJO, 1988).

Há poucos trabalhos publicados que relacionam as dimensões das partículas e as propriedades finais do painel madeira-cimento. Trabalhos mais antigos indicam que o tamanho e geometria da partícula teriam efeitos semelhantes aos painéis tradicionais de resina fenólica, porém trabalhos recentes sugerem uma importante diferença.

Frybort *et al.*, 2008, em sua revisão de literatura sobre o estado da arte na produção de painéis de madeira-cimento, relataram trabalhos que apontam a necessidade de partículas maiores do que as usadas em painéis aglomerados tradicionais, porque a redução das dimensões do material envolve custos econômicos que podem interferir na viabilidade da produção de compósitos madeira-cimento. Este aumento de custo estaria presente tanto na mecanização necessária para fragmentar as partículas, como, pela quantidade maior de cimento necessária para encobrir uma maior área superficial das partículas de madeira menores.

Nazerian *et al.* (2011) analisaram o efeito do tamanho da partícula nas propriedades físicas e mecânicas de painéis madeira-cimento produzidos com uma relação madeira:cimento de 1:3 e com madeira das espécies *Alnus subcordata* e *Populus deltoides*. Foi encontrada uma forte correlação negativa entre o tamanho da partícula e os resultados de MOR e ligação interna. Também foi encontrado uma correlação positiva entre as dimensões das partículas e as propriedades de absorção de água e inchamento de espessura.

2.7.4. Presença de casca

A utilização de casca de essências florestais geralmente não é aconselhável devido aos altos teores de matéria orgânica que influenciam a hidratação do

cimento. Por exemplo, o índice de inibição da madeira de *Eucalyptus grandis* é em torno de 11,75, valor que a classifica como material de inibição moderada. Já para casca desta espécie, o índice de inibição é de 168,26, considerado um material de inibição extremamente alta. A justificativa para esse comportamento pode ser a quantidade de extrativos totais que sofre um aumento de 4 para 20% quando se compara a madeira com a casca. Porém se as cascas forem tratadas com extrações em água fria e NaOH, o seu índice de inibição pode ser baixado para 8,3 que é considerado um índice extremamente baixo (MORI *et al.*, 2007). A produção de painéis madeira-cimento com incorporação de 25% de casca tratada de *Eucalyptus grandis* apresentou valores de compressão paralela maiores dos que os apresentados por painéis produzidos sem adição de casca. A ligação interna, o MOE, absorção de água e inchamento em espessura também não foram alteradas com a adição de 25% de casca tratada. Mas a adição de casca sem tratamento prévio mostrou-se inviável para a produção de painéis madeira-cimento (LOPES *et al.*, 2005).

Silva *et al.* (2006) analisaram o efeito da presença de casca nas propriedades físicas e mecânicas de painéis de madeira de *Eucalyptus urophylla* e cimento Portland ARI. O uso de 5 ou 10% de casca em relação ao peso da madeira afetou negativamente tanto as propriedades mecânicas (MOR, MOE e ligação interna) quanto as propriedades físicas (inchamento em espessura e absorção de água). Sendo que as propriedades de MOE e inchamento em espessura apresentaram diferenças significativas para painéis com 5 ou 10%.

A mesma espécie foi estudada em outro experimento e apresentou resultados diferentes, mas com comportamentos semelhantes. A adição de 10% de casca de *Eucalyptus urophylla* na composição dos painéis não foram o suficiente para alterar as propriedades de ligação interna, MOE e inchamento em espessura após 2 horas. O acréscimo de 20% de casca não alterou o resultado a absorção de água após 2 horas. Nem mesmo com a adição de 25% de casca em relação ao peso da madeira não foi o suficiente para alterar os valores de MOR (SILVA *et al.*, 2005).

2.7.5. Fatores de prensagem

A temperatura ideal para prensa varia entre 40 e 80°C e é influenciado pela composição química da madeira, o tipo do cimento e o uso de aditivos. Após a

prensagem o painel deve ser mantido por volta de 6 a 8 horas grampeados (SIMATUPANG *et al.*, 1991). O tempo de grampo reduz a produtividade em uma empresa de painéis madeira-cimento. Entre os métodos estudados para se diminuir esse tempo, há a exposição dos painéis ao CO₂ na fase inicial do processo.

De acordo com Soroushian *et al.* (2003), o dióxido de carbono abaixa o pH da mistura através da formação de ácido carbônico, que é neutralizado pelo silicato de cálcio presente no cimento que resulta em CaCO₃ mais insolúveis. Os carbonatos são os responsáveis pela ligação interna inicial que permite a liberação da prensa em questões de minutos. Contudo, a concentração do gás deve ser controlada. Uma quantidade excessiva pode provocar um endurecimento muito rápido da superfície que impediria a penetração do gás no interior do painel. O aquecimento excessivo da mistura devido a aceleração exotérmica também pode gerar uma instabilidade dimensional e assim ocasionar micro rachaduras.

Ashori *et al.* (2012) testaram o uso de madeira reaproveitada de dormentes de estrada de ferro para a produção de painéis madeira-cimento. Usando uma pressão de 40 kg/cm² por 5 minutos, eles variaram apenas a temperatura entre 25 e 60°C. Foi observado que as propriedades mecânicas diminuíram com o aumento da temperatura, enquanto que absorção de água e inchamento de espessura aumentou. Porém neste caso, como os dormentes poderiam ter sido tratados com creosoto, uma possibilidade para os baixos valores nos painéis tratados em alta temperatura foi a difusão do produto químico para a superfície reduzindo assim a interação entre madeira e cimento.

2.7.6. Umidade de equilíbrio

A relação entre a umidade de equilíbrio e a umidade relativa (UR) e temperatura (°C) é denominada isoterma de sorção e afeta a resistência mecânica e a estabilidade dimensional de produtos compostos de madeira.

Silva *et al.* (2005) determinaram a umidade de equilíbrio de diversos tipos de painéis de madeira, inclusive de dois tipos de painéis de madeira-cimento sem revestimento. Os valores médios encontrados na temperatura de 30°C e umidade relativa de 40, 50, 60, 70, 80 e 90% encontraram-se entre 9,54 e 11,14. Também foi calculada a histerese através da razão entre as umidades de equilíbrio de absorção

e dessorção e os valores médios encontrados foram de 0,89 e 0,95. Essa diferença foi atribuída a possível variação da granulometria dos painéis.

Foi comprovado que o teor de umidade afeta a performance de painéis madeira-cimento produzidos com adição de CO₂ no processo de pega. Um teor de 30% apresentou melhores valores de ligação interna, MOR e MOE em painéis madeira-cimento produzidos com *Chamaecyparis obtusa* e *Cryptomeria japonica*. Teores de umidades mais baixos apresentaram resultados piores do que os painéis de controle porque a reação de carbonatação não é bem sucedida por causa da quantidade de água insuficiente (MAAIL *et al.*, 2012).

2.7.7. Tempo de cura

Moslemi e Pfister (1987) estudaram o efeito do período de cura dos painéis madeira-cimento nas propriedades físicas e mecânicas. Os autores concluíram que o MOE é dependente do período de 28 dias, porém o MOR e a estabilidade dimensional já apresentaram valores máximos dentro dos primeiros 14 dias.

Blankenhorn *et al.* (1994) analisaram o efeito de 7, 14, 28 e 56 dias de cura na resistência à compressão de cinco tipos diferentes de corpos de prova de madeira-cimento produzidos com *Quercus rubra*, *Acer sacharum*, *Populus tremuloides*, *Acer rubrum* e *Pinus taeda*. A resistência à compressão aumentou de acordo com o maior tempo de cura para todos os casos. Porém aos 28 dias, os corpos de prova com *Pinus taeda*, já haviam atingido cerca de 96% da sua resistência final, enquanto que os de *Quercus rubra* apenas aproximadamente 53% do seu potencial. Assim sendo, o tempo de cura depende também da espécie utilizada no compósito.

Savastano Jr. *et al.* (2000) estudaram compósitos de cimento reforçado com diversos tipos de fibras, entre elas a de *Pinus radiata* e a de sisal (*Agave sisalana*). Os autores não encontraram diferença significativa para compósitos testados com 28 e 42 dias para as propriedades de MOR, MOE e resistência à fratura.

Os painéis madeira-cimento atinge sua resistência máxima somente após 28 dias de cura do cimento, o que pode ser uma desvantagem para o processo de produção quando comparado com painéis de madeira colados com adesivos sintéticos (SIMATUPANG, 1989). Porém, há técnicas que podem encurtar o tempo

de cura dos compósitos sem afetar suas propriedades finais. Latorraca e Iwakiri (2001) testaram a cura de painéis de madeira de *Eucalyptus urophylla* e cimento em câmara vaporizada. Painéis que foram submetidos à cura a vapor apresentaram valores de MOE e compressão paralela, respectivamente, após 7 e 14 dias equivalentes aos painéis curados em câmara climática após 28 dias. Porém o método não apresentou resultado para a redução de tempo necessária para alcançar valores máximos de MOR e ligação interna.

O período de cura de 28 dias também pode ser acelerado para poucos minutos pela utilização de dióxido de carbono, CO_2 , durante o processo de prensagem dos painéis madeira-cimento. O gás acelera a formação de C-S-H e CaCO_3 . As propriedades mecânicas dos painéis aumenta de acordo com o aumento da concentração de CO_2 , porém a injeção de apenas 10% do gás a uma pressão de 7,5MPa é o suficiente para que painéis com 10 minutos de cura apresentem resultados semelhantes aos painéis madeira-cimento tradicionais após 14 dias de cura (HERMAWAN *et al.*, 2002).

2.8. PROPRIEDADES DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO

2.8.1. Flexão estática

a) Módulo de elasticidade

Elasticidade é quando a deformação produzida por uma tensão abaixo do limite proporcional é totalmente recuperada após a remoção da carga. Quando a carga gera uma tensão maior do que o limite proporcional, ocorre deformação plástica ou rompimento. Geralmente a curva de carga por deformação para compósitos de madeira é linear abaixo do limite proporcional. A inclinação da curva linear é o módulo de elasticidade (MOE). Para ensaios de compressão e tensão, esta inclinação pode ser chamada de módulo de Young para ser diferenciada do MOE do teste de flexão. O MOE de flexão é a medida da resistência à flexão, que é relacionada a rigidez (CAI; ROSS, 2010).

Para painéis madeira-cimento, o MOE está principalmente relacionado com a proporção das misturas. Moslemi e Pfister (1987) observaram uma correlação linear

entre MOE e a proporção entre madeira:cimento. A tabela 2.3 apresenta valores médios de MOE encontrados na literatura para painéis madeira-cimento produzidos com diferentes espécies e diferentes relações madeira:cimento.

TABELA 2.3. VALORES DE MOE ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE DIVERSAS ESPÉCIES COM ADIÇÃO DE 3% DE CaCl₂

espécie	M:C	ME (g/cm ³)	MOE (MPa)	Referência
<i>Pinus</i>				
<i>P. caribaea</i>	1:2	1,79	7.813	Erakhrumen <i>et al.</i> (2008)
<i>P. pinaster</i> *	1:3	1,14	4.870	Semple; Evans (2004)
<i>P. radiata</i> *	1:3	1,21	4.990	Semple; Evans (2004)
<i>P. taeda</i>	1:2,75	1,19	4.290	Iwakiri; Prata (2008)
<i>Eucalyptus</i>				
<i>E. bicostata</i>	1:3	1,14	2.634	Semple; Evans (2004)
<i>E. dunnii</i>	1:2,75	1,13	980	Iwakiri; Prata (2008)
<i>E. grandis</i>	1:2,75	1,12	4.780	Iwakiri; Prata (2008)
<i>E. urophylla</i> **	1:2,75	1,09	1.659	Latorraca;Iwakiri (2001)
Outras espécies				
<i>Cecropia hololeuca</i>	1:2,75	1,04	3.232	Iwakiri <i>et al.</i> (2012)
<i>Cedrela odorata</i> ***	1:3	1,33	7.730	Macêdo <i>et al.</i> (2012)
<i>Hymenaea courbaril</i> ***	1:3	1,56	5.220	Macêdo <i>et al.</i> (2012)
<i>Leucaena leucocephala</i>	2,5:1	1,27	4.002	Marzuki <i>et al.</i> (2011)
<i>Schizolobium amazonicum</i>	1:2,75	1,13	3.203	Iwakiri <i>et al.</i> (2012)
<i>Terminalia superba</i>	1:2,3	1,20	3.104	Fuwape;Oyagade (1993)
<i>Toona ciliata</i> **	1:2,75	1,16	4.697	Sá <i>et al.</i> (2010)
<i>Vochysia maxima</i>	1:3	1,43	5.340	Macêdo <i>et al.</i> (2012)

* uso de 2% de CaCl₂; ** uso de 4% de CaCl₂; *** uso de 5% de CaCl₂

FONTE: O autor (2015)

Atualmente uma das tendências para determinação de propriedades mecânicas, especialmente o MOE são as técnicas não-destrutivas. Bejo *et al.* (2005) produziram compósitos madeira-cimento de quatro diferentes espécies de madeira com dimensões de 2 x 0,1 x 0,06 metros para uso final como viga e determinaram o MOE estático e dinâmico. Para todos os tratamentos, o MOE dinâmico foi

aproximadamente duas vezes maior do que o estático. Isso ocorre devido à natureza visco-elástica da madeira. Embora os valores brutos sejam discrepantes, foi determinado uma correlação razoavelmente alta para os diferentes tipos de medição.

b) Módulo de ruptura

O módulo de ruptura indica a resistência à flexão de um corpo causado por uma carga. É uma propriedade muito importante para se determinar a aplicabilidade de um painel na construção civil. Há uma relação positiva entre a massa específica do compósito e as propriedades mecânicas como um todo. Uma maior massa específica, alcançada por uma maior pressão durante o processo de produção, resulta na densificação da madeira, eliminação de possíveis espaços vazios entre as partículas e melhora na conectividade entre o cimento e a madeira (BEJO *et al.*, 2005).

Outra variável no processo que afeta diretamente a propriedade MOR é a orientação das partículas. Cabangon *et al.* (2002) analisaram o efeito da orientação na produção de painéis madeira-cimento com partículas excelsior de *Pinus radiata* e *Populus deltoides* na proporção madeira:cimento de 1:1,25. Painéis com partículas orientadas apresentaram aproximadamente o dobro de valores de MOR do que painéis com partículas aleatórios para testes realizados paralelos à orientação. Comportamento similar também foi observado por Del Menezzi *et al.* (2007) ao usarem partículas tipo flake de *Pinus taeda* na relação madeira:cimento de 1:1. A tabela 2.4 apresenta valores médios encontrados na literatura para o MOR de painéis madeira-cimento produzidos com diferentes espécies e relações madeira:cimento.

TABELA 2.4. VALORES DE MOR ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE DIVERSAS ESPÉCIES COM ADIÇÃO DE 3% DE CaCl_2

espécie	M:C	Den. (g/cm ³)	MOR (MPa)	Referência
<i>Pinus</i>				
<i>P. caribaea</i>	1:2	1,79	46,90	Erakhrumen <i>et al.</i> (2008)
<i>P. pinaster</i> *	1:3	1,14	13,80	Semple; Evans (2004)

continua

TABELA 2.4. VALORES DE MOR ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE DIVERSAS ESPÉCIES COM ADIÇÃO DE 3% DE CaCl_2

conclusão

espécie	M:C	Den. (g/cm^3)	MOR (MPa)	Referência
<i>P. radiata</i> *	1:3	1,21	11,90	Semple; Evans (2004)
<i>P. taeda</i>	1:2,75	1,19	9,41	Iwakiri; Prata (2008)
<i>Eucalyptus</i>				
<i>E. bicostata</i>	1:3	1,14	7,20	Semple; Evans (2004)
<i>E. dunnii</i>	1:2,75	1,13	3,92	Iwakiri; Prata (2008)
<i>E. grandis</i>	1:2,75	1,12	9,90	Iwakiri; Prata (2008)
Outras espécies				
<i>Alnus subcordata</i>	1:3	1,20	11,98	Nazerian <i>et al.</i> (2011)
<i>Cecropia hololeuca</i>	1:2,75	1,04	9,17	Iwakiri <i>et al.</i> (2012)
<i>Cedrela odorata</i> ***	1:3	1,33	9,24	Macêdo <i>et al.</i> (2012)
<i>Hymenaea courbaril</i> ***	1:3	1,56	4,21	Macêdo <i>et al.</i> (2012)
<i>Leucaena leucocephala</i>	1:2,5	1,27	8,95	Marzuki <i>et al.</i> (2011)
<i>Populus deltoides</i>	1:3	1,25	11,45	Nazerian <i>et al.</i> (2011)
<i>Schizolobium amazonicum</i>	1:2,75	1,13	6,80	Iwakiri <i>et al.</i> (2012)
<i>Terminalia superba</i>	1:2,3	1,20	9,00	Fuwape; Oyagade (1993)
<i>Toona ciliata</i> **	1:2,75	1,16	9,19	Sá <i>et al.</i> (2010)
<i>Vochysia maxima</i>	1:3	1,43	7,66	Macêdo <i>et al.</i> (2012)

* uso de 2% de CaCl_2 ; ** uso de 4% de CaCl_2 ; *** uso de 5% de CaCl_2

FONTE: O autor (2015)

2.8.2 . Ligação Interna

Ligação interna ou resistência à tração perpendicular a superfície é resistência máxima suportada por um corpo de prova em um teste em que forças perpendiculares a sua superfície são aplicadas. Sotannde *et al.* (2012) indicaram que o tipo de partícula e a relação madeira:cimento apresentaram efeito significativo nos resultados médios de ligação interna de painéis madeira-cimento produzidos com partículas de *Afzelia africana*. Os autores obtiveram maiores médias em painéis em que as partículas de madeira foram misturadas com a madeira em pó

comparados com os painéis produzidos exclusivamente de partículas ou de pó. A mistura de diferentes granulometrias leva a um compósito com menos espaços vazios e conseqüentemente melhor ligação. A propriedade também melhorou com o aumento da quantidade de cimento em relação à madeira.

Outros fatores estudados na literatura não influenciaram a propriedade de ligação interna. Por exemplo, Santos *et al.* (2008) estudaram a produção de painéis madeira-cimento produzidos com a mistura de 3 espécies (*Eremanthus erythropappus*, *Eucalyptus* spp e *Pinus* spp) em diferentes proporções. Nenhuma combinação de material estudada afetou a propriedade de ligação interna. Também não foi encontrado efeito significativo para painéis produzidos com madeira de *Toona ciliata* de diferentes idades e procedências (Sá *et al.*, 2010).

A tabela 2.5 apresenta um conjunto de valores médios para a propriedade de ligação interna encontrada na literatura para painéis madeira-cimento produzidos partículas de diversas espécies misturadas com 3% de CaCl_2 , diferentes relações madeira:cimento e massa específicas do compósito.

TABELA 2.5. VALORES DE LIGAÇÃO INTERNA ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE DIVERSAS ESPÉCIES COM ADIÇÃO DE 3% DE CaCl_2

espécie	M:C	Den. (g/cm ³)	LI (MPa)	Referência
<i>Pinus</i>				
<i>P. taeda</i>	1:2,75	1,19	0,46	Iwakiri; Prata (2008)
<i>Eucalyptus</i>				
<i>E. dun nii</i>	1:2,75	1,13	0,26	Iwakiri; Prata (2008)
<i>E. grandis</i>	1:2,75	1,12	0,47	Iwakiri; Prata (2008)
Outras espécies				
<i>Alnus subordata</i>	1:3	1,20	0,39	Nazerian et al (2011)
<i>Cedrela odorata</i> **	1:3	1,33	1,60	Macêdo et al (2012)
<i>Cecropia hololeuca</i>	1:2,75	1,04	0,80	Iwakiri et al (2012)
<i>Hymenaea courbaril</i> **	1:3	1,56	1,53	Macêdo et al (2012)
<i>Leucaena leucocephala</i>	1:2,5	1,27	0,59	Marzuki et al (2011)
<i>Populus deltoides</i>	1:3	1,25	0,30	Nazerian et al (2011)
<i>Schizolobium amazonicum</i>	1:2,75	1,131	0,67	Iwakiri et al (2012)

continua

TABELA 2.5. VALORES DE LIGAÇÃO INTERNA ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE DIVERSAS ESPÉCIES COM ADIÇÃO DE 3% DE CaCl_2

conclusão

espécie	M:C	Den. (g/cm ³)	LI (MPa)	Referência
<i>Toona ciliata</i> *	1:2,75	1,16	0,99	Sá et al (2010)
<i>Vochysia maxima</i>	1:3	1,43	1,35	Macêdo et al (2012)

* uso de 4% de CaCl_2 ; ** uso de 5% de CaCl_2
 FONTE: O autor (2015)

2.8.3. Absorção de água e inchamento de espessura

Em geral, as características que tornam os compósitos madeira-cimento produtos atrativos para o mercado são a baixa absorção de água e a boa estabilidade dimensional. Porém, quando comparados com painéis totalmente minerais, não são materiais inertes. A variação dimensional em painéis madeira-cimento ocorre basicamente por quatro processos. O primeiro é devido a alcalinidade do cimento que pode degradar a madeira da mistura. O segundo processo é a carbonatação, que pode ser definida como a conversão de Ca(OH)_2 para o cristal CaCO_3 . A formação deste cristal pode causar uma tensão entre as partículas de madeira e a pasta de cimento tanto na fase úmida da mistura quanto na secagem. O terceiro processo é a movimentação da umidade para dentro e para fora das partículas e do cimento. E por último, o quarto processo é a o resultado das tensões internos durante o processo de fabricação do painel (FAN *et al.*, 2004).

A quantidade de madeira na mistura também é responsável pelo aumento de valores de absorção de água. Quanto maior a quantidade de madeira, menor a massa específica dos compósitos e, conseqüentemente, maior a porosidade do material. O aumento de espaços vazios também pode estar relacionado à compactação inadequada do material (ASHORI *et al.*, 2012).

2.9. PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO DE ESPÉCIES TROPICAIS

Tradicionalmente a madeira tropical não é aplicada na fabricação de compósitos madeira-cimento por duas razões: 1 - a alta massa específica da

madeira que acarreta em painéis de maior massa específica e, por sua vez, pode levar a problemas de transporte e manuseio do material. A alta massa específica da madeira também contribui para o desgaste das lâminas dos equipamentos utilizados na etapa de preparação das partículas (VILELA; DU PASQUIER, 1968); 2 - a tendência de madeiras tropicais serem ricas em extrativos, que podem inibir a pega do cimento. Segundo Pettersen (1984), extrativos solúveis em solventes neutros variam entre 4 e 10% do peso seco de madeiras temperadas, mas em madeiras tropicais pode chegar até a 20%.

Contudo, algumas pesquisas indicam que a inibição à pega do cimento pela mistura de material proveniente de madeira tropical não deve ser generalizada. A tabela 2.6 apresenta uma breve revisão de literatura indicando as espécies tropicais, sem tratamento prévio, e suas compatibilidades com o cimento analisadas.

TABELA 2.6. GRAUS DE COMPATIBILIDADE ENTRE ESPÉCIES TROPICAIS E CIMENTO TIPO PORTLAND RELATADOS NA LITERATURA

espécie	Compatibilidade	Referência
<i>Afzelia bipindensis</i>	Baixa	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Afzelia quanzensis</i>	Média	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Albizia adianthifolia</i>	Média	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Amblygonocarpus andongensis</i>	Alta	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Aspidosperma dugandii</i>	Baixa	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Bombacopsis quinata</i>	Alta	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Brachystegia speciformis</i>	Média	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Brosimum alicastrum</i>	Alta	Vieira <i>et al.</i> (2005)
<i>Calophyllum mariae</i>	Alta	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Cedrela odorata</i>	Média	Macedo <i>et al.</i> (2012)
<i>Chlorophora excelsa</i>	Baixa	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Clarisia racemosa</i>	Baixa	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Cinamomum parviflorum</i>	Alta	Vieira <i>et al.</i> (2005)
<i>Colubrina arborescens</i>	Baixa	Vieira <i>et al.</i> (2005)
<i>Cordia collococca</i>	Alta	Vieira <i>et al.</i> (2005)
<i>Couratari oblongifolia</i>	Média	Macedo <i>et al.</i> (2012)
<i>Couratia pulchra</i>	Alta	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Daillonella toxisperma</i>	Baixa	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Distemonanthus benthamianus</i>	Alta	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Dinizia excelsa</i>	Baixa	Macedo <i>et al.</i> (2012)
<i>Entandrophragma cylindricum</i>	Alta	Fan <i>et al.</i> (2012)

continua

TABELA 2.6. GRAUS DE COMPATIBILIDADE ENTRE ESPÉCIES TROPICAIS E CIMENTO TIPO PORTLAND RELATADOS NA LITERATURA

conclusão

espécie	Compatibilidade	Referência
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Baixa	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Eribroma oblongum</i>	Média	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Erythrophleum ivorense</i>	Média	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Erythrophleum suaveoleuns</i>	Média	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Eschweilera monosperma</i>	Média	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Genipa americana</i>	Baixa	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Graffenrieda latifolia</i>	Alta	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Hieronyma moritziana</i>	Alta	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Hymenaea courbaril</i>	Baixa	Macedo <i>et al.</i> (2012)
<i>Jacaranda copia</i>	Baixa	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Juglans insularis</i>	Alta	Vieira <i>et al.</i> (2005)
<i>Julbernadia globiflora</i>	Média	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Khaya ivorensis</i>	Média	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Khaya nyasica</i>	Baixa	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Laurocerasus occidentalis</i>	Alta	Vieira <i>et al.</i> (2005)
<i>Mansonia altissima</i>	Baixa	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Millettia stuhlmannii</i>	Baixa	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Nauclea diderrichii</i>	Baixa	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Piptadenia rigida</i>	Baixa	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Protium negletum</i>	Baixa	Vilela; DuPasquier (1968)
<i>Pterocarpus angolensis</i>	Baixa	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Pterocarpus soyauxii</i>	Média	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Sterculia appendiculata</i>	Baixa	Alberto <i>et al.</i> (2000)
<i>Sterculia rhinopetala</i>	Alta	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Swietenia mahogoni</i>	Baixa	Vieira <i>et al.</i> (2005)
<i>Symphonia globulifera</i>	Baixa	Macedo <i>et al.</i> (2012)
<i>Terminalia superba</i>	Média	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Triplochiton scleroxylon</i>	Média	Fan <i>et al.</i> (2012)
<i>Vochysia maxima</i>	Média	Macedo <i>et al.</i> (2012)
<i>Zuelania guidonia</i>	Alta	Vieira <i>et al.</i> (2005)

FONTE: O autor (2015)

Um dos poucos trabalhos que envolveu madeiras tropicais da Amazônia na produção de painéis madeira-cimento foi realizado por Macedo *et al.* (2012) que utilizaram resíduos de indústrias madeireiras da Amazônia como matéria-prima. A compatibilidade entre seis espécies (*Cedrela odorata* L., *Couratari oblongifolia* Duck

et R. Knuth, *Dinizia excelsa* Duck, *Hymenaea courbaril* L., *Symphonia globulifera* L. e *Vochysia maxima* Ducke), natural e lavada, e o cimento foi determinada pelo método da resistência à compressão axial. Também foi testado o uso de aditivos sobre a madeira lavada: 3 e 5% de cloreto de cálcio e 3% de sulfato de alumínio. A resistência média dos corpos de prova produzidos com madeira de Angelim (*Dinizia excelsa*) não tratada foi de 0,6 MPa. A lavagem das partículas aumentou a resistência para 0,95 MPa. Dentre os aditivos, o que apresentou melhor resultado foi o uso de 3% de cloreto de cálcio, que apresentou um valor médio de 11,46 MPa de resistência a compressão axial. Dentre as seis espécies estudadas, o Angelim foi o que se mostrou menos apto para a produção de compósitos madeira-cimento.

2.10 . ESPÉCIES DE MADEIRA

Nas últimas décadas, a demanda crescente de madeira direcionou a atenção para as florestas tropicais. Espécies tropicais possuem um grande diâmetro, textura atraente, alta durabilidade e resistência a decomposição, por isso são usadas em várias indústrias, como a moveleira, estrutural e de painéis de madeira recostituída.

As dez famílias mais comuns, abrangendo 74% das árvores na região amazônica brasileira, são: Fabaceae, Sapotaceae, Lecythidaceae, Moraceae, Burseraceae, Chrysobalanaceae, Malvaceae, Euphorbiaceae, Lauraceae e Myristicaceae. Vinte e cinco por cento de todas as árvores de grande porte pertencem a Fabaceae. Os dez gêneros mais comuns em relação a frequência dos indivíduos são *Eschweilera* (5,6%), *Pouteria*, *Licania*, *Tetragastris*, *Eperua*, *Inga*, *Protium*, *Swartzia* e *Virola* (STEEGE *et al.*, 2006).

2.10.1. *Eschweilera coriacea* (DC.) Mart.

Eschweilera coriacea é conhecida popularmente como Piãozinho, mas também pode ser encontrada com os nomes populares de Matamatá, Matamatá-branco, Matamatá-preto ou ainda Matamatá-amarelo (FEARNSIDE, 1997). É uma espécie de dossel que pode atingir uma altura de até 37 m, distribuída por toda a região Amazônica, sendo sua ocorrência mais frequente na Amazônia Oriental (NELSON; OLIVEIRA, 2001, *apud* LOPES, 2007). É uma espécie abundante em

florestas de terra firme, mas também podem ser encontradas em áreas sazonalmente inundadas de várzeas e igapós (PIRES; PRACE, 1977, *apud* LOPES, 2007).

A madeira da espécie *Eschweilera coriacea* é de coloração amarelo-parda e possui cerne e alburno indistintos (MOUTINHO, 2008). Bentes-Gama *et al.* (2002) estudaram o potencial produtivo de madeira em uma região secundária de várzea baixa no estuário amazônico e apontaram a espécie *Eschweilera coriacea* como a de maior índice de valor de importância econômica dentre as espécies que ainda não são comercialmente exploradas. Os autores apontaram um rendimento potencial de US\$ 56,5/ha para esta espécie.

Nogueira *et al.* (2005) encontraram uma massa específica de aproximadamente 0,7 g/cm³ para indivíduos procedentes de terra firme da Amazônia Central. Porém, outros autores encontraram indivíduos com massa específica mais altos, por exemplo, Fearnside (1997) citou trabalhos com a variação de massa específica entre 0,73 e 0,81 g/cm³, enquanto que Moutinho (2008) apresentou indivíduos desta espécie com massa específicas de até 0,9 g/cm³.

Microscopicamente a madeira de *Eschweilera coriacea* pode apresentar grãos de sílica nas células procumbentes do raio e no parênquima axial. Ocasionalmente também podem ser encontradas cadeias de cristais de oxalato (MOUTINHO, 2008).

A madeira desta espécie tem a tendência de ser mais rica em extrativos (entre 10 e 12% de extrativos totais) e possuir baixo teores de cinzas (em torno de 2%) quando comparadas com as demais espécies do gênero *Eschweilera* (MOUTINHO, 2008).

2.10.2. *Swartzia recurva* Poepping

A espécie *Swartzia recurva* é conhecida pelo nome popular de Muiragiboia, embora também pode ser conhecida no Brasil como Saboarana ou Saboarana branca e na Guiana como Itikiburabaili. São árvores de porte mediana a grande, com seiva cor de sangue. É comum nas matas de igapó, de rios e igarapés de água preta, em solos arenosos. Grande dispersão, principalmente no estado do

Amazonas e com menor freqüência no Pará. Ocorre também no Suriname, Guiana, Venezuela e Colômbia (LOUREIRO *et al.*, 1979).

Madeira da espécie é considerada pesada ($0,8 \text{ g/cm}^3$) e apresenta um cerne de coloração castanho a castanho avermelhado ou pardacento com veias, manchas ou listras escuras arroxeadas ou quase pretas. O alburno é fortemente demarcado e apresenta uma cor amarelo creme. É uma madeira fácil de trabalhar e recebe bom acabamento com polimento muito atrativo (LOUREIRO *et al.*, 1979). Anéis de crescimento indistintos a levemente distintos, quando presentes, demarcados por faixas de parênquima marginal de 1 a 2 células de largura e uma mudança gradual de parênquima aliforme-confluente para paratraqueal (AGYALOSSY-ALFONSO; MILLER, 2002). Souza *et al.* (2012) indicaram que o produto econômico mais importante das leguminosas da região do Alto Rio Negro é a madeira, sendo que a espécie *Swartzia recurva* foi classificada como uma das espécies com potencial de florestamento e reflorestamento devido ao seu valor madeireiro.

2.10.3. *Manilkara amazonica* (Huber) Standley

Também conhecida pelo nome popular Abiurana ou Maparajuba. É uma espécie da família Sapotaceae e apresenta árvores de grande porte (podendo chegar até a 50 m de altura) e fuste retilíneo. Sua madeira apresenta cerne e alburno distintos, sendo o cerne de coloração marrom-avermelhado-escuro a vermelho-escuro, enquanto que o alburno é rosa. Apresenta ainda anéis de crescimento distintos (LOUREIRO *et al.*, 1979).

É uma madeira pesada com valores de massa específica variando entre 0,83 e $0,87 \text{ g/cm}^3$. Cerca de 9% do volume da madeira é referente ao alburno (FEARNside, 1997). A espécie ainda pode ser chamada pelo nome popular de Maçaranduba e SILVA *et al.* (2007) citaram outras pesquisas indicando que a massa específica da madeira para essa espécie pode ser mais alta, chegando a valores acima de $0,9 \text{ g/cm}^3$.

2.10.4. *Inga paraensis* Ducke.

Conhecida popularmente como Ingarana, Ingá-branco ou, simplesmente, Ingá, é uma espécie da família Fabaceae. É uma espécie freqüente em regiões de

terra firme da Amazônia. Em um inventário em uma floresta primária no município de Novo Ariuanã, na Amazônia Central, foram levantadas 1.938 árvores de 210 espécies em parcelas de 1,9 ha, sendo que a espécie *Inga paraensis* foi a sexta mais freqüente, com 44 indivíduos (TSUCHIYA *et al.*, 2006).

A espécie apresenta troncos retilíneos, com DAP médio de 44 cm e altura comercial de 5 metros. A madeira é de coloração marrom-avermelhado-clara, com listras amarelo-oliva na face radial, sendo que não há diferenciação visível entre cerne e alburno. Os anéis de crescimento distintos e grã cruzada irregular (LOUREIRO *et al.*, 1979).

Fearnside (1997) apresenta referencias que indicam que a madeira de *Inga paraensis* é pesada com massa específica de 0,82 g/cm³.

2.10.5. *Inga alba* (Sw.) Willd.

O *Inga alba* tem ocorrência na região Amazônica e em toda a orla litorânea, desde o Rio Grande do Norte até o norte de Santa Catarina. Também conhecida como Ingá-xixica ou, simplesmente, Ingá (FEARNSIDE, 1997). Segundo Melo e Gomes (1979) são árvores de porte alto, atingindo até 35m de altura com tronco bastante grosso e freqüente nas matas de terra firme dos estados do Pará, Amazonas e Ceará.

A massa específica da madeira varia de acordo com a referência. Fearnside (1997) apresenta um valor médio de 0,62 g/cm³, enquanto que Melo e Gomes (1979) indicam que a madeira pode ser mais pesada, chegando a uma massa específica de 0,81 g/cm³.

A madeira apresenta uma coloração rósea-esbranquiçada com poucos poros (até 3 poros/mm²) bem distintos a olho nu. As camadas de crescimento são demarcadas por zonas fibrosas escuras (MELO; GOMES, 1979). Souza e Silva (2003) realizaram um levantamento de espécies com potencial de uso econômico na região do baixo Rio Negro na Amazônia e indicaram a madeira *Inga alba* dentre as de bom potencial econômico e industrial.

As propriedades químicas relatadas por Melo e Gomes (1979) são apresentados respectivamente nas tabelas 2.7.

TABELA 2.7. VALORES DE PROPRIEDADES QUÍMICAS DA MADEIRA DE *Inga alba*

Celulose (%)	Lignina (%)	Resíduos Mineral fixo (%)	Água fria (%)	Água quente (%)	NaOH 1% (%)	Alcool benzol (%)	Pentosanas (%)
51,72	27,72	0,27	4,86	6,00	18,07	4,31	11,65

FONTE: (MELO;GOMES,1979, p 23)

2.10.6. *Eschweilera odora* (poepp.) Miers

Também conhecida no Brasil como Matá-matá branco, Morrão vermelho. No Suriname é chamada de Hoogland-manbarklak, Epronmanbarklak, Manbarklak, Kakaralli e Black Kakaralli. Na Guiana Francesa é denominada Mahot noir. É relativamente freqüente em mata alta de terra firme nos estados do Amazonas, Pará e Amapá e nas Guianas e América Central (LOUREIRO *et al.*, 1979).

Esta espécie apresenta indivíduos de altura mediana (16 m), com fuste retilíneo de aproximadamente 55 cm de diâmetro, casca acinzentada com 1,0 cm de espessura (INPA/CPPF, 1991). Madeira da *Eschweilera odora* é considerada pesada, apresentando uma massa específica que pode variar entre 0,80 a 0,95 g/cm³ (LOUREIRO *et al.*, 1979). Devido a alta massa específica torna-se uma madeira difícil de serrar, recomenda-se o uso de serra estelitadas. No entanto, apresenta-se moderadamente fácil para aplainar e recebe bom acabamento (INPA/CPPF, 1991). O cerne é diferenciado do alburno, sendo de coloração claro pardacento a castanho-escuro às vezes listrado, enquanto que o alburno tende a ser amarelado. Apresenta a grã direita e uma textura média. Pode apresentar também um cheiro desagradável quando fresca, mas que desaparece após a secagem (LOUREIRO; SILVA, 1968).

Madeira altamente resistente aos fungos apodrecedores *P. sanguineus* e *P. fumosus*, avaliada através de testes de laboratório. Toras cortadas e deixadas na floresta durante 18 meses não sofreram ataque de fungos (INPA/CPPF, 1991). A madeira possui alto teor de sílica (0,3 a 2,0%) e também é altamente resistente ao ataque de insetos (LOUREIRO *et al.*, 1979). A tabela 2.8 apresenta o levantamento das propriedades químicas da madeira de *Eschweilera odora* realizado por Corrêa (1970) citado por Pettersen (1984).

TABELA 2.8. PROPRIEDADES QUÍMICAS DA ESPÉCIE *Eschweilera odora*

Celulose (%)		Lignina	Extrativos (%)			Cinzas (%)
α-celulose	pentosana	Klason (%)	1% NaOH	Água quente	EtOH/ Benzeno	
50	13	32	18	6	<1	0,9

FONTE: (PETTERSEN, 1984, p. 82)

2.10.7. *Pouteria guianensis* Aubl.

Conhecida popularmente pelo nome de Abiurana, a *Pouteria guianensis* apresenta indivíduos de porte médio, fuste cilíndrico, de diâmetro superior a 60 cm, casca sulcada, avermelhada, com 0,5 cm de espessura. Madeira pesada; cerne castanho-escuro, alburno amarelo-escuro. Devido a alta massa específica (aproximadamente 0,9 g/cm³), a madeira é considerada difícil de serrar e recomenda-se o uso de serra estelitadas para desdobro (INPA/CPPF, 1991).

Madeira altamente resistente aos fungos apodrecedores *P. sanguineus* e *P. fumosus*, avaliada através de testes de laboratório. Toras cortadas e deixadas na floresta durante 12 meses não sofreram ataque de fungos (INPA/CPPF, 1991). Barbosa *et al.* (2007) estudaram propriedades antitermíticas do extrato da madeira da *Pouteria guianensis* da Amazônia Central e encontraram compostos com propriedades de repelência ao cupim *Nasutitermes sp.*

As propriedades químicas apresentadas por Pettersen (1984) citando um trabalho de Côrrea (1970) são indicadas na tabela 2.9.

TABELA 2.9. PROPRIEDADES QUÍMICAS DA ESPÉCIE *Pouteria guianensis*

Celulose (%)		Lignina	Extrativos (%)			Cinzas (%)
α-celulose	pentosana	Klason (%)	1% NaOH	Água quente	EtOH/ Benzeno	
54	7	30	13	3	2	0,3

FONTE: (PETTERSEN, 1984, p. 83)

2.10.8. *Byrsonima crisper* A. Juss

A espécie *Byrsonima crisper* da família Malpighiaceae é conhecida popularmente pelo nome Murici da mata ou, simplesmente, Murici. Evidências arqueológicas encontradas no baixo Amazonas, datadas entre 9 e 8.000 anos antes de Cristo indicam que a madeira desta espécie já era usada por indígenas (ROOSEVELT, 2000).

O gênero *Byrsonima*, que nos Neotrópicos soma aproximadamente 150 espécies, mas que pode ser representado por seis espécies principais, entre elas a *B. crisper*. Esta espécie apresenta indivíduos de porte pequeno a médio e frequentemente encontradas em platôs, vertentes, baixios e capoeiras (VICENTINI *et al.*, 1999).

Alvino *et al.* (2005) analisaram o potencial de uso de espécies arbóreas em floresta secundária na zona Bragantina, Pará, e indicaram a espécie *Byrsonima crisper* como de baixo valor comercial com uma frequência de 1,33 ind/ha.

A madeira deste gênero é considerada leve e utilizada na construção civil para caibros e vigas (VICENTINI *et al.*, 1999). Bila (2014) encontrou um valor médio de massa específica aparente de 0,89 g/cm³.

2.11. REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, L. K., SINGH, J. Effect of plant fibre extractives on properties of cement. **Cement and Concrete Composites**. v. 12, p.103-108. 1990
- AGYALOSSY-ALFONSO, V., MILLER, R. B. Wood anatomy of the Brazilian species of *Swartzia* and considerations within the tribe Swartzieae. **IAWA Journal**. v. 23, n.4, p. 359-390. 2002
- AHN, W. Y., MOSLEMI A.A. SEM Examination of wood-portland cement bonds. **Wood Science** v.13, n.2, p. 77-82, 1980.

ALBERTO, M. M., MOUGEL, E., ZOULALIAN, A. Compatibility of some hardwoods species with portland cement using isothermal calorimetry. **Forest Product Journal**. v. 50, n. 9, p.83-88, 2000

ALVINO, F. O.; SILVA, M. F. F.; RAYOL, B. P. Potencial de uso das espécies arbóreas de uma floresta secundária, na Zona Bragantina, Pará, Brasil. **Acta Amazonica**. v.35. n. 4. p. 413-420. 2005

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C266-04**: Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Paste by Gillmore Needles. 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C39/C39M-04**: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2004

ARAÚJO, H. J. B., Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânica de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**. v. 37. n. 3, p.399- 416, 2007

ASHORI, A., TABARSA, T., SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite boards made from poplar strands. **Construction and Building Materials**. v.26. p.131-134. 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2008.

BADEJO, S. O. O. Effect of flake geometry on properties of cement-bonded particleboard from mixed tropical hardwood. **Wood science and technology**. v. 22. p. 357-370. 1988

BADEJO, S. O., OMOLE, A. O., FUWAPE, J. A., OYELEYE, B. O. Static bending and moisture response of cement bonded particleboard produced at different levels of percent chemical additive content in board. **Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment**. v. 7. n. 4. p.111-120. 2011.

BARBOSA, A. P.; NASCIMENTO, C. S.; MORAIS, J. W. Estudos de propriedades antitermíticas de extratos brutos de madeira e casca de espécies florestais da Amazônia Central, Brasil. **Acta Amazonica**. v. 37. n. 2. p. 213-218. 2007

BEJO, L., TAKATS, P., VASS, N. Development of cement bonded composite beams. **Act Silv. Lign. Hung.** v.1. p. 111-119. 2005

BENTES-GAMA, M. M., SCOLFORO, J. R. S., GAMA, J. R. V. Potencial produtivo de madeira e palmito de uma floresta secundária de várzea baixa no estuário amazônico. **Revista Árvore**. v. 26, n.3. p. 311-319. 2002.

BERALDO, A. L., CARVALHO, J. V. Compósito *Eucalyptus grandis* - cimento Portland. **Scientia Forestalis**. V. 65. p.150-161. 2004.

BIBLIS, E.J.; LO, C. Sugar and other wood extractives: effect on the setting of southern pine-cement Mixtures. **Forest Products Journal**, v. 18, n. 8, p. 28-34, 1968.

BILA, N. F. **Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeira tropicais da Amazônia**. Dissertação de mestrado em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná. 2014. 74p.

BILBA, K., ARSENE, M. A., OUENSANGA, A. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. **Cement and Concrete Composites**. v. 25. p. 91-96 2003

BLANKENHORN, P. R., LABOSKY JR. P., DICOLA, M., STOVER, L. R., Compressive strength of hardwood-cement composites. **Forest Product Journal**. v.44, n.4, p.59-62. 1994

BOUSTINGORRY, P., GROSSEAU, P., GUYONNET, R., GUILHOT, B. The influence of wood aqueous extractives on the hydration kinetics of plaster. **Cement and Concrete Research**. v.35, n.11. p. 2081-2086. 2005

CAI, Z., ROSS, R. J. Mechanical properties of wood based composite materials In: BERGMAN, R. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Forest Product Laboratory. p. 12.1-12.12. 2010

CABANGON, R. J., CUNNINGHAM, R. B., EVANS, P. D. Manual strand orientation as a means of improving the flexural properties of wood-wool cement board in the Philippines. **Forest Products Journal**. v. 52., n. 4. p.53-59. 2002.

CHEUMANI, Y. A. M., NDIKONTAR, M., DE JÉSO, B., SÈBE, G. Probing of wood-cement interactions during hydration of wood-cement composites by proton low-field NMR relaxometry. **Journal of Material Science**. v.46. p 1167-1175. 2011

COLLEPARDI, M., MONOSI, S., MORICONI, G., PAURI, M., Influence of gluconate, lignosulfonate or glucose on the C₃A hydration in the presence of gypsum with or without lime. **Cement and Concrete Research**. v. 14. p. 105-112. 1984

DEL MENEZZI, C. H. S., CASTRO, V. G., SOUZA, M. R. Production and properties of a medium density wood-cement boards produced with oriented strands and silica fume. **Maderas. Ciencia y tecnología**. v.9. n.2. p. 105-115. 2007.

ERAKHRUMEN, A. A., AREGHAN, S. E., OGUNLEVE, M. B., LARIND, S. L., ODEVALE, O. O. Selected physico-mechanical properties of cement-bonded particleboard made from pine (*Pinus caribaea* M.) sawdust-coir (*Cocos nucifera* L.) mixture. **Scientific Research and Essay**. v. 3. n. 5. p.197-203. 2008

EVANS, P. D. An introduction to wood-cement composites. in: EVANS, P. D. **Wood-cement composites in the Asia-Pacific region**. ACIAR Proceedings n. 107. p.7-10, 2002

FAN, M. Z., BONFIELD, P. W., DINWOODIE, J. M., BOXALL, J. BREESE, M. C. Dimensional instability of cement-bonded particleboard: the effect of surface coating. **Cement and concrete research**. n. 34. p. 1189-1197. 2004

FAN, M., NDIKONTAR, M. K., ZHOU, X., NGAMVENG, J. N. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and building materials**. v. 36. p. 135-140. 2012

FEARNSIDE, P. M. Wood density for estimating biomass in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**. v. 90. p. 59-87. 1997

FRYBORT, S., MAURITZ, R., TEISCHINGER, A., MULLER, U. Cement bonded composites - a mechanical review. **BioResources**. v. 3. n.2. p. 602-626. 2008

FUWAPE, J. A., OYAGADE, A. O. Bending strength and dimensional stability of tropical wood-cement particleboard. **Bioresource technology**. v. 44. p.77-79. 1993

GLASSER, F. P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilisation. **Journal of hazardous material**. v. 52. p. 151-170. 1997

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. Dissertação de mestrado em Recursos minerais e hidrogeologia. Universidade de São Paulo. 2003. 157p.

GOVIN, A., PESCHARD, A., FREDON, E, GUYONNET, R. New insights into wood and cement interaction. **Holzforschung**. v. 59. p. 330-335. 2005

HACHMI, M., MOSLEMI, A.A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. **Forest Products Journal**, Madison, v. 39, n. 6, p. 55-58, 1989.

HACHMI, M., MOSLEMI A. A., CAMPBELL, A. G. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**. V. 24. p. 345-354, 1990

HERMAWAN, D., HATA, T., KAWAI, S., NAGADOMI, W., KUROKI, Y. Effect of carbon dioxide-air concentration in the rapid curing process on the properties of cement-bonded particleboard. **Journal of Wood Science**. n. 48. p. 179-184. 2002.

HOFSTRAND, A.D.; MOSLEMI, A.A. e GARCIA J. F. Curing characteristics of wood particle from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, 1984.

HUANG, C. **Study on the manufacturing technology of cement bonded particleboard using CCA-treated wood**. Dissertação de mestrado em Engenharia Florestal. University of New Brunswick. 1999. 135p

INPA/CPPF **Catálogo de madeiras da Amazônia: Características tecnológicas; área da hidrelétrica de Balbina**. Manaus, 1991. 153p.

IWAKIRI, S., PRATA, J. G. Utilização da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* na produção de painéis de cimento-madeira. **Cerne**. v. 14. n. 1. p. 68-74. 2008

IWAKIRI, S., SILVA, L. S., TRIANOSKI, R., BONDUELLE, G. M., ROCHA, V. Y. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* "Paricá" e *Cecropia hololeuca* "Embaúba" para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**. v. 18. n. 2. p. 303-308. 2012

JORGE, F. C., PEREIRA, C., FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 62. p.370-377. 2004

JUENGER, M. C. G., JENNINGS, H. M. New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. **Cement and Concrete Research**. v.32. p.393-399. 2002

KARADE, S. R., IRLE, M., MAHER, K. Assessment of wood-cement compatibility: a new approach. **Holzforschung**. v. 57. p.672-680. 2003

KARADE, S. R., IRLE, M., MAHER, K. Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 64. p.281-286. 2006

KASIM, A., SIMATUPANG, M. H. Einflubeiniger tropenholzarten auf die abbundung und druckfestigkeit von gips-hozgemischen. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 47. p. 391-396. 1989

LATORRACA J. V.; IWAKIRI S., LELIS R. C. Efeito Inibidor de cinco espécies Florestais sobre a cura do compósito cimento-madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 6, n. 1, p. 76-82, 1999.

LATORRACA J. V.; IWAKIRI S. Efeito da cura a vapor sobre as propriedades mecânicas de painéis cimento-madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 84-93, 2001.

LEE, A.W.C. Effect of cement/wood ratio on bending properties of cement-bonded southern pine excelsior board. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 17, n. 3, p. 361-364, 1985.

LEE A. W. C., HONG, Z. Compressive strength of cylindrical samples as an indicator of wood-cement compatibility. **Forest Product Journal**. v. 36. n.11/12. p. 87-90. 1986

LOPES, Y. L. V., MORI, F. A., MENDES, L. M., LATORRACA, J. V. F., TRUGILHO, P. F., SILVA, G. C. Avaliação do potencial técnico da madeira e casca de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na produção de painéis cimento-madeira. **Scientia Forestalis**. n. 67. p.111-122. 2005

LOPES, M. A. Population structure of *Eschweillera coriacea* (DC.) S. A. Mori in forest fragments in eastern Brazilian Amazonia. **Revista Brasil. Bot.** v. 30, n. 3. p.509-519. 2007

LOUREIRO, A. A., SILVA, M. F. **Catálogo das madeiras da Amazônia**. Primeiro volume. SUDAM, Belém, 1968. 433p.

LOUREIRO, A. A., SILVA, M. F., ALENCAR, J. C. **Essências madeireiras da Amazônia**. Volume II. INPA, Belém, 1979. 187p.

MAAIL, R. S., UMEMURA, K., AIZAWA, H., KAWAI, S. Effect of moisture content on manufacturing cement-bonded particleboard using supercritical CO₂. **Journal of Wood Science**. n. 58. p. 31-37. 2012.

MACEDO, A. N., SOUZA, A. A. C., NETO, B. B. P. Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da região Amazônica. **Ambiente Construído**. v.12. n.2. p. 131-150. 2012

MARZUKI, A. R., RAHIM, S., HAMIDAH, M. AHMAD RUSLAN, R. Effects of wood:cement ratio on mechanical and physical properties of three-layered cement-bonded particleboards from *Leucaena leucocephala*. **Journal of tropical forest science**. v. 23. n. 1. p. 67-72. 2011

MATSUSHITA, Y., MIYAWAKI, S., YASUDA, S. Manufacture of wood-cement boards VIII: cement-hardening inhibitory compounds of keyaki (Japanese zelkova, *Zelkova serrata*). **Journal of Wood Science**. v. 49, p. 281-284. 2003

MATOSKI, A., HARA, M. M., IWAKIRI, S., CASALI, J. M. Influence of accelerating admixtures in wood-cement panels: characteristics and properties. **Acta Scientiarum. Technology**. v. 35. n. 4, p. 655-660. 2013

MELO, C. F. M., GOMES, J. I. **Estudo químico e micrográfico de madeiras da Amazônia**. Comunicado técnico n. 19. EMPRAPA, Belém, 1979. 70 p.

MILLER, D. P., MOSLEMI, A. A. Wood-cement composites: species and heartwood-sapwood effects on hydration and tensile strength. **Forest Product Journal**. v. 41, n. 3. p. 9-14. 1991(a)

MILLER, D. P., MOSLEMI, A. A. Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. **Wood and Fiber Science**. v. 23, n. 4. p. 472-482. 1991(b)

MORI, S. A., PRANCE, G. T. Lecythidaceae part II: the zygomorphic flowered New World genera. **Flora Neotropica Monograph**. v. 21. n.2. p1-376. 1990

MORI, F. A., LOPES, Y. L. V., MENDES, L. M., LATORRACA, J. V. F. Estudo da compatibilidade entre a madeira e a casca de *Eucalyptus grandis* e cimento Portland. **Ciência Florestal**. v. 171. n.3. p.257-264. 2007

MOSLEMI, A.A., LIM Y. T. Compatibility of southern hardwood with Portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 7/8, p. 22-26, 1984.

MOSLEMI, A.A., PFISTER S. C. The influence of cement/wood ratio and type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 19, n. 2, p. 165-175 , 1987.

MOUTINHO, V. H. P. **Caracterização das madeiras conhecidas na Amazônia brasileira como Matá-matá (*Lecythidaceae* fam. A. Rich.)**. Dissertação de mestrado em Ciência e tecnologia da madeira. Universidade Federal de Lavras. 2008. 78p.

NAZERIAN, M., GHALEHNO, M. D., GOZALI, E. Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood-cement composites on physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard. **Wood Material Science and Engineering**. v. 6. p. 196-206. 2011

NOUGUEIRA, E. M., NELSON, B. W., FEARNSIDE, P. M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**. v. 208. p.261-286. 2005

ODLER, I. Hydration, setting and hardening of Portland cement in: LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. Quarta edição. Elsevier. 2003. 1092p

OLORUNNISOLA, A. O. Effects of pre-treatment of rattan (*Laccosperma secundiflorum*) on the hydration of Portland cement and the development of a new compatibility index. **Cement and concrete composites**. v. 30. p. 37-43. 2008

OLORUNNISOLA, A. O. Effect of husk particle size and calcium chloride on strength and sorption properties of coconut husk-cement composites. **Industrial crops and products**. v. 29. p. 495-501. 2009.

OKINO, E. Y. A., SOUZA, M. R., SANTANA, M. A. E., ALVES, M. V. S, SOUZA, M. E, TEIXEIRA D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus* spp. cement-bonded particleboards. **Cement and Concrete Composites**, v. 27 p.333-338, 2005

OYAGADE, A. O. Compatibility of some tropical hardwood species with portland cement. **Journal of tropical forest science**. v. 6, n.4 p. 387-396. 1994

PEREIRA, C., CALCEIRA, F., IRLE, M. A., FERREIRA, J. M. F. Characterizing the setting of cement when mixed with cork, blue gum, or maritime pine, grown in Portugal I: temperature profiles and compatibility indices. **Journal of wood science**. n. 52. p. 311-317. 2006

PEREIRA, C., CALCEIRA, F., FERREIRA, J. M. F., IRLE, M. A. Characterization of cement-bonded particleboards manufacture with maritime pine, blue gum and cork grown in Portugal. **European Journal of Wood Products**. v. 70. p. 107-111. 2012

PESCHARD, A., GOVIN, A., GROSSEAU, P., GUILHOT, B., GUYONNET, R. Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages. **Cement and Concrete Research**. v. 34. n. 11. p. 2153-2158. 2004

PESCHARD, A., GOVIN, A., POURCHEZ, J., FREDON, E., BERTRAND, L., MAXIMILIEN, S., GUILHOT, B. Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 26. p. 1439-1445. 2006

PETTERSEN, R. C., The chemical composition of wood in: ROWELL, R. **The chemistry of solid wood. Advances in chemistry series 207.** Washington. American Chemical Society.p.57-126. 1984

POURCHEZ J., GOVIN, A., GROSSEAU, P., GUYONNET, R., GUILHOT, B., RUOT, B. Alkaline stability of cellulose ethers and impact of their degradation products on cement hydration. **Cement and Concrete Research.** v.36. n.7, p.1252-1256. 2006

PRESTEMON D. R. Preliminary evaluation of a wood-cement composite. **Forest Products Journal**, Madison, v. 26, n.2, p. 43-45, 1976.

PREVITE, R. W., GRACE, W. R., Some insights on the mechanism of saccharide set retardation of Portland cement. **Cement and Concrete Research.** v. 1. p.301-316. 1971

ROOSEVELT, A. C. The lower Amazon: a dynamic human habitat. In: LENTZ, D. L. **Imperfect balance: landscape transformation in the Precolumbian Americas.** Columbia University. Columbia. 2000. 549p

SÁ, V. A., MENDES, L. M., COUTO, A. M., LIMA, N. N. Manufatura de painéis cimento-madeira de cedro australiano (*Toona ciliata* M. Roem var. *australis*) de diferentes procedências e idade. **Scientia Forestalis.** v.38. n. 88. p. 559-566. 2010.

SANDERMANN, W. e KOHLER, R. Über eine kurze eignungsprüfung von holzern für zement-gebundene werkstoffe. **Holzforschung** v. 18, n.12, p.53-59. 1964

SANTOS, R. C.; MENDES, L. M.; MORI, F. A.; MENDES, R. F. Aproveitamento de resíduo da madeira de Candeia (*Eremanthus erythropappus*) para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne.** v. 14, n. 3. p. 241-250. 2008

SAVASTANO JR, H., WARDEN, P. G., COUTTS, R. S. P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and concrete composites.** v. 22. p. 379 - 384. 2000.

SEMPLE, K. E., EVANS, P., D. Compatibility of some Australian acacias with Portland cement. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 56. p. 24. 1998

SEMPLE, K. E., CUNNINGHAM, R. B., EVANS, P. D. Cement hydration test using wood flour may not predict the suitability of *Acacia mangium* and *Eucalyptus pellita* for manufacture of wood-wool cement boards. **Holzforschung**. v. 53. n. 3. p. 327-332, 1999

SEMPLE, K. E., EVANS, P., D., CUNNINGHAM, R. B. Compatibility of 8 temperate Australian *Eucalyptus* with Portland cement. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 58. p. 315-316. 2000

SEMPLE, K. E., EVANS, P., D. Screening inorganic additives for ameliorating the inhibition of hydration of Portland cement by the heartwood of *Acacia mangium*. In: EVANS, P. D. **Wood-cement composites in the Asia-Pacific region**. ACIAR Proceedings n. 107. p. 29-39. 2002

SEMPLE, K. E., EVANS, P. D. **Wood-cement composites - suitability of western Australian mallee eucalypt, blue gum and melaleucas**. RIRDC. Barton. 2004. 65p.

SILVA, A. N.; VIADAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. S.; LATORRACA, J. V. F. Biomassa vegetal para uso em chapas de cimento-madeira. **Revista Universidade Rural, Série Ciências da Vida**. v. 22. n. 2. p. 199-203. 2002

SILVA, G. A., MENDES, L. M., TRUGILHO, P. F., MORI, F. A., SANTOS, I. F. Umidade de equilíbrio de painéis de madeira. **Revista Árvore**. v. 29. n. 4. p. 639-646. 2005

SILVA, G. C., LATORRACA, J. V. F., TEXEIRA, D. E., BORTOLETTO JR, G. Produção do compósito madeira e casca de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e cimento Portland. **Scientia Forestalis**. v. 68. p. 59-67. 2005

SILVA, G. C., LATORRACA, J. V. F., CARMO, J. F., FERREIRA, E. S. Efeito de aditivos minerais sobre as propriedades de chapas cimento-madeira. **Revista Árvore**. v. 30. n. 3. p. 451-456. 2006

SILVA, G. C., LATORRACA, J. V. F., LELIS, R. C., TEXEIRA, D. E., CARMO, J. F., FERREIRA, E. S. Produção de painéis de cimento-madeira com adição de diferentes proporções de casca e microssílica. **Ciência Florestal**. v. 16. n. 1. p. 61-70. 2006

SILVA, M. G., NUMAZAWA, S., ARAUJO, M. M., NAGAISHI, T. Y. R., GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**. v. 37, n. 1. p. 61-70. 2007

SIMATUPANG, M. H. Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebunder Holzspanplatten. **Holz als Roh-und Werkstoff**. v. 27. p.379-382. 1979.

SIMATUPANG, M. H. Mineral-Bonded Wood Composites. In: SCHNIEWIND, A. P. **Concise Encyclopedia of Wood & Wood-Based Materials**. MIT Press, Cambridge. pg. 250. 1989.

SIMATUPANG, M. H. Mixed inorganic binder for wood cement composites. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 48. p. 376. 1990

SIMATUPANG, M. H., SEDDIG, N., HABIGHORST, C., GEIMER, R. L. Technologies for rapid production of mineral-bonded wood composite boards. in: MOSLEMI, A. **Inorganic bonded wood and fiber composite materials**. Forest Products Research Society. p. 18-27. 1991

SIMATUPANG, M. H., SCHMITT, U., KASIM, A. Wood extractives of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and their influences on the setting of the inorganic binder in gypsum-bonded particleboards. **Journal of tropical forest science**. v. 6, n. 3. p. 269 - 285. 1992

SJOSTROM, E., WESTERMARK, U. Chemical composition of wood and pulps: basic constituents and their distribution. In: SJOSTROM, E., ALÉN, R. **Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking**. Springer, Berlim, p.1-20,1999.

SKOOG, D., WEST, D., HOLLER, F., CROUCH, S. **Fundamentos de química analítica**, 8ª edição. Editora Pioneira Thomson, São Paulo, 2006. 1025p.

SOROUSHIAN, P., WON, J. P., CHOWDHURY, H., NOSSONI, A. Development of accelerated processing techniques for cement-bonded wood particleboard. **Cement and concrete composites**. n. 25. p. 721-727. 2003

SOTANDE, O. A.; OLUWADARE, A. O.; OGEDOH, O.; ADEOGUN P. F. Evaluation of cement-bonded particle board produced from *Azela africana* wood residues. **Journal of Engineering Science and Technology**. v. 7. n. 6. p. 732-743. 2012

SOUZA, L. A. G.; SILVA, M. F. Bioeconomical potential of Leguminosae from the lower Negro river, Amazon, Brazil. **Lyonia**. v. 5. n.1. p.15-24. 2003

SOUZA, L. A. G., AGUIAR, A. M. C. S P., DANTAS, A. R., LOPES, M. C. Diversidade de leguminosas do Alto Rio Negro e seu potencial de aproveitamento bioeconômico. In: SOUZA, L. A. G; CASTELLON, E. G. **Projeto Fronteira: desvendando as fronteiras do conhecimento na região amazônica do Alto Rio Negro**. INPA. Manaus. p. 99-124. 2012.

STEEGE, H., PITMAN, C. A., PHILLIPS, O. L., CHAVE, J., SABATIER, D., DUQUE, A., MOLINO, J., PRÉVOST, M., SPICHIGER, R., CASTELLANOS, H., HILDEBRAND, P., VÁSQUEZ, R. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. **Nature**. v. 443. p. 444-447. 2006

STOKKE, D. D., WU, Q., HAN, G. **Introduction to wood and natural fiber composites**. John Wiley & Sons, West Sussex, 2014. 297p

STUTZMAN, P. Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure. **Cement & Concrete Composites**. v. 26. p. 957-966. 2004

THOMAS, N. L., BIRCHALL, J. D., The retarding action of sugar on cement hydration. **Cement and Concrete Research**. v. 13, n.6 . p. 830-842. 1983

TONOLI, G. H. D., RODRIGUES FILHO, U. P., SAVASTANO JR., H., BRAS, J., BELGACEM, M. N., ROCCO LAHR, F. A. Cellulose modified fibres in cement based composites. **Composites: part A**. v. 40. p.2046-2053. 2009

TSUCHIYA, A.; TANAKA, A.; HIGUCHI, N.; LISBOA, P. B. Growth of trees and microclimates in gap dependent forest in Central Amazonia. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Naturais**. v.1, n.2 p.47-63. 2006

VAICKELIONIS, G., VAICKELIONIENE, R. The influence of organic and mineral additives on hydration of cement. **Medziagotyra**. v.9, n.3. p. 218-223. 2003

VAICKELIONIS, G., VAICKELIONIENE, R. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics - Silikáty**. v.50, n.2. p. 115-122. 2006

VICENTINI, A.; ANDERSON, W. R. Malpighiaceae In: RIBEIRO,J.; HOPKINS, M.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C.; COSTA, M.; BRITO, J.; SOUZA, M.; MARTINS, L. LOHMANN, L.; ASSUNÇÃO, P. PEREIRA, E.; SILVA, C.; MESQUITA, M.; PROCÓPIO,L. **Flora da reserva Ducke - guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme da Amazônia Central**. INPA-DFID, Manaus. p. 505-511. 1999

VIEIRA, D. V., AYALA, K. M., SOSA, M. C., RIVERO, C. G. Resíduos maderables. Aptitud de nueve especies latifolias de diferentes macizos montñosos para la fabricación de ecomateriales. **Revista Forestal Baracoa**. v. 24, n.1, p. 41 - 47. 2005

VIEIRA, J. P. **Interacção cimento-superplastificante. Avaliação da estabilidade do comportamento**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade técnica de Lisboa. 2010. 138p.

VILELA, E., DU PASQUIER, B. Determinación del coeficiente de aptitud de un grupo de maderas para su posible aplicación em la fabricación de tableros de papilla de madera y cemento. **Revista Forestal Venezolana**. v.11. n. 16. p. 75-84. 1968

WALKER, J. C. F. **Primary wood processing: principles and practice**. 2^a Edição. Springer. Holanda. 2006. 596p.

WANG, X., YU, Y. The compatibility of two common fast-growing species with Portland cement. **Journal of Indian Academy of Wood Science**.v.9, n.2. p154-159. 2012

WEATHERWAX R. C. e TARKOW H. Effect of wood on setting of portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v.14, p. 567-570, 1964.

WEATHERWAX R. C. e TARKOW H. Effect of wood on setting of portland cement: decayed wood as an inhibitor. **Forest Products Journal**, Madison, v.17, n. 7, p. 30-32, 1967.

WEI, Y. M., ZHOU, Y. G., TOMITA, B. Hydration behavior of cement-based composite I: evaluation of wood species effects on compatibility and strenght with ordinary portland cement. **Journal of Wood Science**. v. 46. p.296-302. 2000 a

WEI, Y. M., ZHOU, Y. G., TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. **Journal of Wood Science**. v. 46. p.444-451. 2000 b

WEI, Y. M., TOMITA, B., HIRAMATSU, Y., MIYATAKE, A., FUJII, T. Study of hydration behaviors of wood-cement mixtures: compatibility of cement mixed with wood fiber strand obtained by water-vapor explosion process. **Journal of Wood Science**. v. 48. p.365-373. 2002

WEI, Y. M., TOMITA, B., HIRAMATSU, Y., MIYATAKE, A., FUJII, T., FUJII, T., YOSHINAGA, S. Hydration behavior and compressive strength of cement mixed with

exploded wood fiber strand obtained by the water-vapor explosion process. **Journal of Wood Science**. v. 49. p.317-326. 2003

YASUDA, S., IMA, K., MATSUSHITA, Y. Manufacture of wood-cement boards VII: cement-hardening inhibitory compounds of hannoki (Japanese alder, *Alnus japonica* Steud.). **Journal of Wood Science**. v. 48, p. 242-244. 2002

YOUNG, J. F. A review of the mechanisms of set-retardation in Portland cement pastes containing organic admixtures. **Cement and Concrete Research**. v. 2. p. 415-433. 1972

YOUNG, R. A. Historical developments in wood chemistry. **SDUJ Faculty of Forestry**. v. 1. p.1-15. 2008

3. COMPATIBILIDADE ENTRE MADEIRA DE ESPÉCIES TROPICAIS E O CIMENTO PORTLAND TIPO II

3.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das indústrias de painéis madeira-cimento teve início nos anos 30, embora a maior parte das inovações ocorreu nos últimos 40 anos (FRYBORT *et al.*, 2008). Este tipo de compósito combina vantagens tanto dos componentes orgânicos como inorgânicos. A incorporação do cimento leva a um painel com alta estabilidade dimensional, alta resistência aos agentes biodegradadores e resistência a fogo, ao mesmo tempo que a mistura com madeira resulta em painéis mais leves em relação ao concreto, de maior trabalhabilidade e com boas características acústicas e de isolamento térmico (MOSLEMI, 1989).

Porém entre as principais dificuldades na produção deste tipo de painel está a seletividade das espécies de madeiras utilizadas na mistura (MOSLEMI e PFISTER, 1987). Segundo Latorraca *et al.* (1999), os componentes orgânicos afetam tanto a possível interação entre a madeira e o cimento, quanto as interações internas do próprio cimento, resultando em painéis de qualidade inferior. A incompatibilidade da mistura madeira-cimento é normalmente associada aos extrativos (JORGE *et al.*, 2004). Devido ao fato das madeiras tropicais tradicionalmente apresentarem maior teor de extrativos do que madeiras temperadas, seu uso é geralmente descartado nas indústrias de painéis madeira-cimento. Contudo, este procedimento pode ser prematuro, uma vez que a inibição da cura do cimento não é relacionada apenas com a quantidade de extrativo, mas também com sua composição química. Yasuda *et al.* (2002) indicaram dois principais grupos de componentes inibidores: carboidratos de sacarose e componentes fenólicos.

Vilela e Du Pasquier (1968) realizaram um estudo pioneiro sobre a aptidão de espécies tropicais para a produção de painéis madeira-cimento. Os autores analisaram a compatibilidade de 27 espécies da Venezuela e da Colômbia das quais 7 foram consideradas entre boas e muito boas para a fabricação de painéis, contradizendo a crença de que todas as espécies tropicais são inviáveis para produção de compósitos madeira-cimento.

O objetivo deste capítulo foi correlacionar o grau de compatibilidade entre cimento Portland tipo II - Z e madeira de oito espécies da Amazônia com a quantidade e composição química dos extrativos presentes nestas espécies.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1. Preparo do material

Foram utilizadas oito espécies de madeira tropical nesta pesquisa, indicadas na tabela 3.1, procedente da Estação Experimental de Silvicultura Tropical (EEST), do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, no km 50 da BR-174 (Manaus – Boa Vista), distante 60 km de Manaus, com uma área de 21.000 hectares. A figura 3.1 indica na imagem de satélite a localização da EEST em relação à cidade de Manaus, AM.

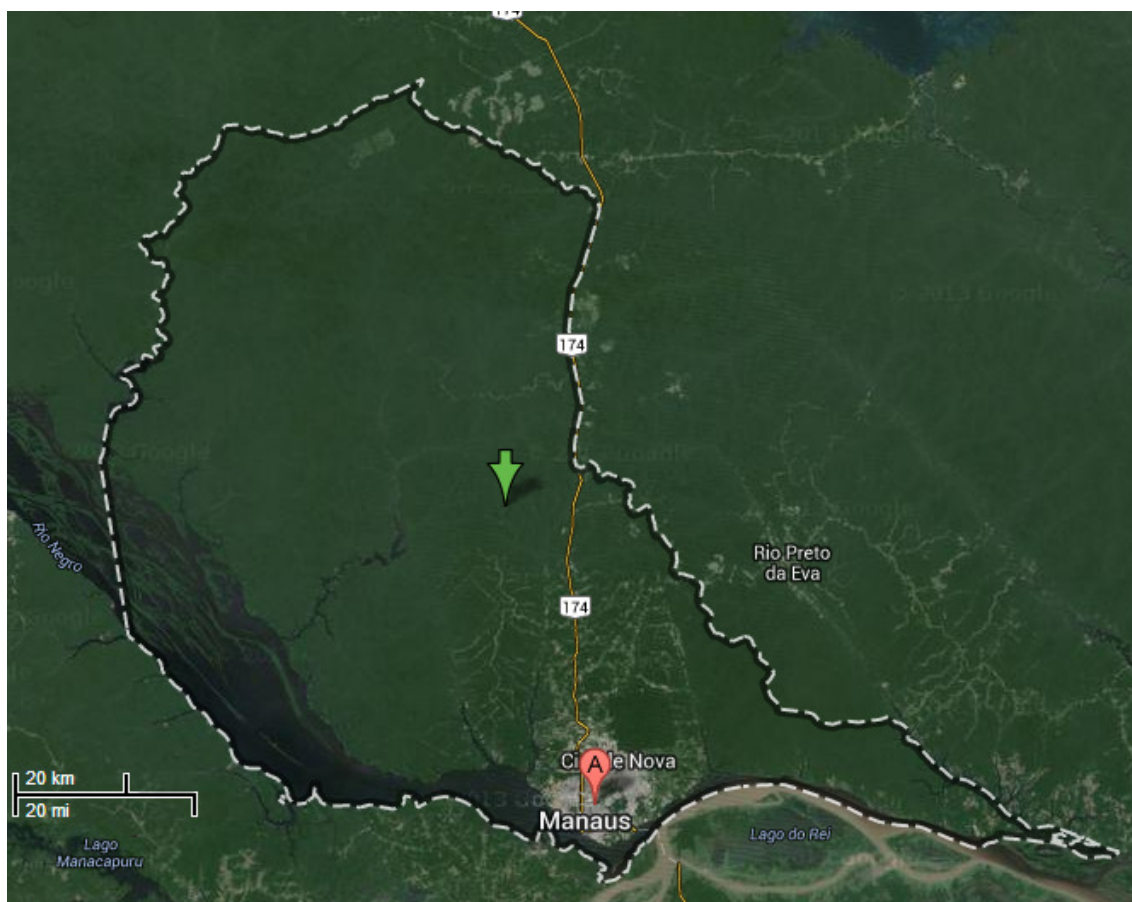


FIGURA 3.1. LOCALIZAÇÃO DA EEST (02O 37' S, 60O 11' W) INDICADA PELA SETA.
FONTE: GOOGLE MAPS, 2014

Foram colhidas 15 árvores com diâmetro a altura do peito (DAP) entre 25 e 60 cm dentro de uma parcela de 1 hectare da EEST.

TABELA 3.1. LISTA DE ESPÉCIES TROPICAIS UTILIZADAS NA PESQUISA

Nome popular	Nº de árvores coletadas	DAP médio (cm)	Altura média (m)	Nome científico
Piãozinho	4	35,7	13,6	<i>Eschweilera coriaceae</i> (A. DC. Mori.)
Muiragiboia	1	38,0	14,8	<i>Swartzia recurva</i> Poepp.
Abiurana	1	57,0	14,7	<i>Manilkara amazonica</i> (Huber)
Inga vermelha	1	42,0	8,80	<i>Inga paraensis</i> Ducke
Inga vermelha	1	41,5	14,9	<i>Inga alba</i> (Sw.) Willd
Matamata	3	35,3	11,0	<i>Eschweilera odora</i> (Poepp.) Miers
Abiurana	1	32,0	16,1	<i>Pouteria guianensis</i> Aubl.
Murici	3	31,8	11,7	<i>Byrsonima crisper</i> Juss

FONTE: O autor (2015)

O material foi enviado para o Laboratório de Painéis de Madeira, da Universidade Federal do Paraná - UFPR, em forma de costaneiras. As costaneiras foram descascadas e seccionadas em tamanhos proporcionais à entrada do picador de disco.

Parte da madeira seccionada de todas as espécies foi destinada para geração de partículas, em um picador de disco, usando a madeira *in natura*. As partículas geradas foram então secas em duas etapas antes de serem submetidas ao moinho de martelo. As partículas foram inicialmente expostas ao sol para a redução inicial do teor de umidade. A segunda etapa foi conduzida em estufa convencional com circulação de ar forçada a temperatura de 80°C por um período de 24 horas, reduzindo o teor de umidade para aproximadamente 3%.

O restante da madeira seccionada foi mantido submerso em água fria por um período de 7 dias. Durante o período de imersão, a água foi trocada diariamente para estimular a extração de substâncias que poderiam inibir a cura do cimento. A partir deste ponto, a geração de partículas foi semelhante à do primeiro grupo.

Após a moagem, as partículas de ambos os grupos foram classificadas em peneiras sendo selecionadas aquelas que passaram na peneira com 0,84 mm de abertura e ficaram retidas na peneira de 0,5 mm.

O aglutinante empregado foi o cimento Portland composto tipo CP II-Z. Este tipo de cimento apresenta uma composição intermediária entre o Portland comum e o Portland com adição. Em sua composição química há presença de 6 à 14% de material pozolânico (ABCP, 2002). A escolha deste tipo específico de cimento se deve ao fato de que ele corresponde a aproximadamente 75% da produção industrial nacional (ABCP, 2002) e pode ser encontrado em todos os estados brasileiros, inclusive na região amazônica.

3.2.2. Teste de hidratação

Uma quantidade de 90,5 ml de água destilada foi misturada com 200 gramas de cimento e 15 gramas de madeira. A quantidade de água foi baseada no experimento de Weatherwax e Tarkow (1964), que sugere o uso de 2,7 ml de água por grama de madeira seca e um adicional de 0,25 ml de água por grama de cimento.

A mistura ocorreu em sacos de polietileno, sendo que o tempo não excedeu cinco minutos, e em seguida colocada em um recipiente isolado termicamente e hermeticamente fechado. Para a leitura das temperaturas, termopares tipo "J" foram conectados a um módulo condicionador de sinais analógicos acoplado a uma placa de conversão analógica-digital. Foram realizadas leituras de temperatura a cada minuto durante 48 horas para três repetições de cada tratamento. Com base nos parâmetros obtidos, foram utilizados três diferentes métodos para determinar a inibição da cura do cimento induzida pela madeira:

T_R - Uma variação do método de Weatherwax e Tarkow (1964) sugerida por Olorunnisola (2008), onde a inibição é indicada pela razão entre o tempo da pega da mistura, ou seja, o tempo para a reação atingir sua temperatura máxima, pelo tempo da cura do cimento sem adição de madeira. As madeiras podem ser classificadas em três categorias de acordo com seu valor de T_R : compatíveis ($\leq 1,5$); aceitáveis

(valores entre 1,5 e 2), ou seja, necessitam um pré-tratamento; e incompatíveis (≥ 2) (OLORUNNISOLA, 2008).

FATOR- C_A - Método sugerido por Hachmi e Moslemi (1989), este fator é a razão entre a área do gráfico da reação com mistura de madeira e a área do gráfico da reação do cimento com água, sem adição de madeira. Para determinação deste fator, é considerado o tempo entre 3,5 h após a mistura e 24h. Valores de fator- C_A acima de 68 indicam uma madeira compatível com o cimento sem necessidade de pré-tratamento, enquanto que valores abaixo de 28 representam espécies incompatíveis. Valores entre 28 e 68 indicam a necessidade de um pré-tratamento da madeira (HACHMI e MOSLEMI, 1989).

ÍNDICE DE INIBIÇÃO (II) - Este índice foi inicialmente sugerido por Hofstrand *et al.* (1984) e leva em consideração a temperatura máxima da reação, o tempo para se atingir essa temperatura e a taxa máxima de incremento de temperatura da reação. Com base nestes parâmetros o índice é calculado pela fórmula:

$$II = 100 [(t - t' / t') (T' - T / T') (S' - S / S')] (%)$$

SENDOS:

II - índice de inibição da cura do cimento (%)

t - tempo necessário para atingir a temperatura máxima de hidratação do cimento da mistura de cimento, água e madeira (h)

t' - tempo da temperatura máxima de hidratação do cimento da mistura cimento e água (h)

T' - Temperatura máxima atingida para mistura cimento água ($^{\circ}\text{C}$)

T - Temperatura máxima atingida para cimento água e madeira ($^{\circ}\text{C}$)

S' - $\Delta T' / \Delta t'$ - Máximo incremento no período de 1 hora para mistura cimento água

S - $\Delta T / \Delta t$ - Máximo incremento no período de 1 hora para mistura cimento água madeira.

A inibição da madeira à cura do cimento pode ser classificada em quatro categorias de acordo com o índice de inibição: baixa ($II < 10$); moderada ($II = 10 - 50$); alta ($II = 50 - 100$); e extrema ($II > 100$) (OKINO *et al.*, 2005).

3.2.3. Análise química

As análises das propriedades químicas da madeira foram realizadas em amostras secas das costaneiras sem casca, ou seja, antes do período de 7 dias de

imersão em água fria. O material foi transformado em serragem por um moinho de martelo e classificado em peneiras manuais, sendo utilizado as partículas que passaram em peneira de 40 *mesh* e ficaram retidas na peneira de 60 *mesh*, conforme indicado na norma TAPPI 264 cm-97.

Foram determinadas a solubilidade em água fria e água quente (TAPPI 207 cm-99), solubilidade em Hidróxido de Sódio (NaOH) (TAPPI 212 om-02), extrativos em Etanol-tolueno 1:2 (adaptação da norma TAPPI 280 pm-99), materiais inorgânicos ou cinzas (TAPPI 211 om-02) e pH (adaptação da norma TAPPI 252 om-07).

a) Quantificação dos monosacarídeos

As amostras foram pré-hidrolisadas com H_2SO_4 12M a 30°C por 2 horas e posteriormente com H_2SO_4 1M a 100°C por 3 horas. O ácido foi neutralizado com adição de BaCO_3 , sendo que o produto BaSO_4 foi removido por centrifugação. As amostras foram reduzidas no período de 1 hora a 100°C. Os derivados acetilados foram extraídos com CHCl_3 (500 μl) e solução $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (5% v/v).

Os derivados foram analisados em um cromatógrafo a gás acoplado a um espectrômetro de massa de tipo ion-trap modelo Saturn 2000R e coluna capilas DB-225, tendo como gás de arraste hélio ultrapuro com fluxo de 1 ml/min, com rampa de temperatura entre 50°C a 220°C (aquecimento de 50°C por minuto, mantido durante 20 minutos).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Análise química quantitativa

A tabela 3.2 apresenta os teores dos extrativos, obtidos com diversos solventes, presentes nas oito espécies tropicais.

TABELA 3.2. TEORES MÉDIOS DE EXTRATIVOS (%)

Espécie	Etanol - Tolueno	Água Fria	Água Quente	1% NaOH
<i>Eschweilera coriaceae</i>	7,79 ^b (4,26)	2,04 ^{ab} (11,88)	7,53 ^b (1,68)	13,12 ^d (6,52)
continua				
<i>Swartzia recurva</i>	6,53 ^c (5,29)	2,03 ^{ab} (10,56)	6,69 ^{bcd} (7,23)	16,61 ^{ab} (5,08)
<i>Manilkara amazonica</i>	9,24 ^a (5,82)	2,52 ^a (22,66)	6,98 ^{bc} (5,03)	13,52 ^{cd} (9,35)
<i>Inga paraensis</i>	8,36 ^{ab} (7,27)	2,32 ^{ab} (22,28)	8,71 ^a (0,85)	17,36 ^a (1,09)
<i>Inga alba</i>	4,61 ^d (10,68)	1,79 ^{ab} (25,86)	7,23 ^{bc} (7,11)	14,71 ^{cd} (0,71)
<i>Eschweilera odora</i>	7,68 ^b (0,82)	2,60 ^a (7,26)	6,50 ^{cd} (4,14)	15,18 ^{bc} (2,16)
<i>Pouteria guianensis</i>	3,16 ^e (7,36)	1,60 ^{ab} (22,78)	6,07 ^d (1,86)	13,14 ^d (2,61)
<i>Byrsonima crispera</i>	3,19 ^e (3,07)	1,20 ^b (34,08)	5,94 ^d (0,63)	13,32 ^d (1,47)

SENDO: Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

Os valores encontrados para a porcentagem de extrativos de algumas das espécies estudadas foram diferentes aos apresentados na literatura. Por exemplo, Moutinho (2008) encontrou porcentagens mais altas de extrativos solúveis em água fria (5,3 e 6%) e água quente (9,3 e 8,5%) para dois indivíduos da espécie *Eschweilera coriaceae*. Araújo (2007) encontrou 4,9% de extrativos solúveis em água fria para a espécie *Inga alba*. A explicação para estes desvios pode ser pelo fato de que a madeira analisada neste estudo foi retirada da costaneira, adjacente à casca. Segundo Hillis (1971), extrativos estão presentes em maior quantidade no

cerne do que no alburno, e a mudança na quantidade pode variar de maneira abrupta na periferia do cerne.

O procedimento de extração com água fria extrai componentes inorgânicos, taninos, gomas, açúcares e material corante presente na madeira. O procedimento com água quente remove o amido, além dos componentes solúveis em água fria (TAPPI 207 cm-99, 1999). Os açúcares presentes na madeira são tidos como os maiores responsáveis pela inibição da cura do cimento, por isso é importante destacar as espécies com altos teores de extrativos em água fria: *Manilkara amazonica* e *Eschweilera odora*, ambas apresentaram valores médios estatisticamente superiores ao da *Byrsonima crispera*. Porém, segundo Peschard *et al.* (2006), o amido afeta a taxa de crescimento dos cristais de CaOH_2 comprometendo a resistência final do cimento. A espécie *Inga paraensis* apresentou um valor médio de extrativo em água quente estatisticamente superior aos das demais espécies, o que indica a possível presença de quantidades inibitórias de amido que podem agir como inibidores da cura da mistura.

A extração em solução de NaOH contém carboidratos de baixo peso molecular oriundos principalmente da hemicelulose e da celulose degradada (TAPPI T212 om-02, 2002). Wei *et al.* (2002) indicaram que os componentes resultantes da degradação da hemicelulose é um dos principais inibidores da cura do cimento. As espécies *Swartzia recurva* e *Inga paraensis* foram as que obtiveram maior porcentagem deste tipo de extrato com valores acima de 16%.

A extração com solvente orgânico contém ácidos graxos, seus ésteres e compostos lipofílicos. Dentre os solventes orgânicos o etanol-tolueno é um dos que resulta em uma maior quantidade de extrativos (SUN; TOMKINSON, 2003). Simatupang *et al.* (1992) relatou o comportamento inibitório de ácidos graxos, livres ou estratificados, na pega do gesso. É provável que este comportamento também se repita na reação de pega do cimento. Dentre as espécies com maior teor de extrativos com etanol-tolueno, encontram-se a *Manilkara amazonica*, *Inga paraensis* e as duas espécies de *Eschweilera*.

A tabela 3.3 apresenta os valores médios de pH em dois intervalos de medição (2 e 24 horas) e o teor de cinzas encontrados para as espécies estudadas.

TABELA 3.3. VALORES MÉDIOS DE TEOR DE CINZAS E pH DAS ESPÉCIES ESTUDADAS

Espécie	Teor de cinzas (%)	pH 2h	pH 24h
<i>Eschweilera coriacea</i>	0,41 ^{cd} (4,62)	4,91 ^b (2,43)	4,91 ^b (2,75)
<i>Swartzia recurva</i>	0,42 ^{bc} (5,93)	5,29 ^a (1,71)	5,18 ^b (3,80)
<i>Manilkara amazonica</i>	0,19 ^f (4,23)	3,48 ^d (5,06)	3,99 ^c (6,90)
<i>Inga paraensis</i>	0,47 ^b (6,78)	5,24 ^a (3,38)	5,40 ^b (2,17)
<i>Inga alba</i>	0,35 ^{de} (3,83)	5,28 ^a (0,29)	5,33 ^b (0,50)
<i>Eschweilera odora</i>	0,64 ^a (1,92)	4,69 ^b (1,19)	5,00 ^b (4,61)
<i>Pouteria guianensis</i>	0,33 ^e (3,90)	4,24 ^c (1,52)	6,16 ^a (4,88)
<i>Byrsonima crista</i>	0,70 ^a (2,88)	4,92 ^b (0,77)	5,35 ^b (5,14)

SENDO: Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

O teor de cinzas refere-se aos constituintes inorgânicos da madeira e nas espécies tropicais esta porcentagem pode chegar a até 5%. Os principais componentes encontrados nas cinzas de madeira são cálcio, potássio e magnésio. Sendo que em espécies tropicais, pode haver presença de sílica em quantidades até mesmo maior do que de cálcio (FENGEL, 1989). Para a misturas de madeira-cimento, um alto teor de cinzas poderia agir como material pozolânico. A sílica pode reagir com o hidróxido de cálcio e formar uma quantidade extra de gel C-S-H, responsável pela resistência do cimento (BIRICIK *et al.*, 1999). Porém, para todas as espécies de madeiras estudadas, os teores de cinzas apresentados foram muito baixos (entre 0 e 1%) para que este efeito benéfico de compatibilidade pudesse ser considerado.

O cimento Portland é suscetível ao meio ácido, sendo capaz de afetar sua cura e resultar em um material final de baixa resistência. O grau de degradação está correlacionado com o quão baixo é o pH. Valores de pH abaixo de 6,5 são

considerados ruins para a reação de cura e valores de pH abaixo de 4,5 seriam considerados muito ruins (NEVILLE; BROOKS, 2010). Todos os valores médios de pH após 24 horas estão abaixo da faixa de 6,5, sendo que a espécie *Manilkara amazonica* apresentou um resultado de pH igual a 3,99 o que a classificaria em uma faixa extremamente perniciosa à cura do cimento.

3.3.2. Análise química dos monossacarídeos

A tabela 3.4 apresenta os resultados obtidos para a quantificação dos tipos de açúcares presentes nas amostras após pré-tratamento em água fria por 7 dias.

TABELA 3.4. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MONOSSACARÍDEOS DAS ESPÉCIES ESTUDADAS APÓS PRÉ-TRATAMENTO EM ÁGUA FRIA (EM %)

	<i>Eschweilera coriaceae</i>	<i>Swartzia recurva</i>	<i>Manilkara amazonica</i>	<i>Inga paraensis</i>	<i>Inga alba</i>	<i>Eschweilera odora</i>	<i>Pouteria guianensis</i>	<i>Byrsonima crista</i>
Mannose	12,14	0,70	9,40	5,52	2,93	4,65	22,84	7,06
Glucose	62,05	61,12	70,74	74,69	49,51	63,96	58,55	68,23
Arabinose	1,52	3,15	1,32	1,20	2,04	1,19	1,87	1,08
Xilose	17,31	32,29	12,60	8,11	40,41	24,00	8,25	17,60
Fucose	0,18	0,10	0,00	0,50	0,17	0,15	0,00	0,15
Galactose	5,39	1,87	4,67	8,10	3,91	4,96	5,52	4,14
Ramnose	1,38	0,74	1,25	1,63	1,03	1,02	2,94	1,66

FONTE: O autor (2015)

Segundo Sjostrom (1993), a hemicelulose de espécies tropicais variam em quantidade e qualidade, mas os principais componentes são os polissacarídeos glicoronoxilana e glucomanano. A glicoronoxilana varia entre 15 e 30% em madeiras tropicais enquanto que a glucomanano entre 2 e 5%. A quantidade de glicoronoxilana pode ser observada pela porcentagem de xilose na madeira. Já a glucomanano apresenta uma relação glucose:mannose que pode variar de 1:2 a 1:1 dependendo da espécie.

Entre as oito espécies estudadas, duas espécies apresentaram uma porcentagem de xilose acima de 30% (*Swartzia recurva* e *Inga alba*) e três espécies, abaixo de 15% (*Manilkara amazonica*, *Inga paraensis* e *Pouteria guianensis*).

O monossacarídeo mais abundante em todas as espécies foi a glucose. Especulando que a relação glucose:mannose do polisacarídeo glucomanano é de 1:1, a diferença entre a quantidade de glucose e de mannose é relativa à celulose da

madeira. Quatro espécies apresentaram porcentagens de glucose provenientes da celulose acima de 60%: *Swartzia recurva* (60,42%), *Manilkara amazonica* (61,34%), *Inga paraensis* (69,17%) e *Byrsonima crissa* (61,17%). A espécie com menor porcentagem de celulose é a *Pouteria guianensis* (35,71%).

3.3.3 . Testes de hidratação

A figura 3.2 apresenta os gráficos que representam as reações exotérmicas entre o cimento e as madeiras *in natura* das espécies estudadas.

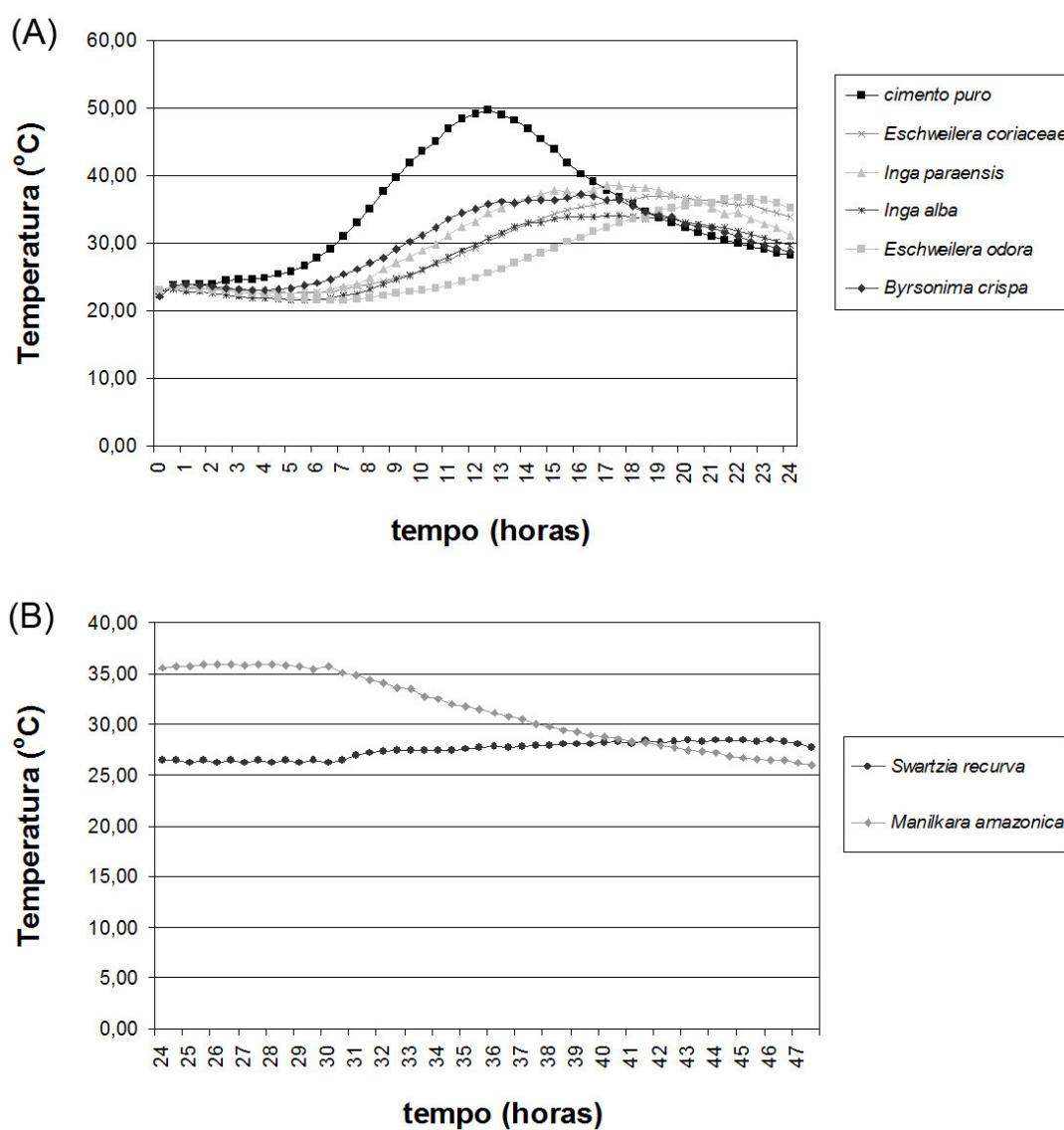
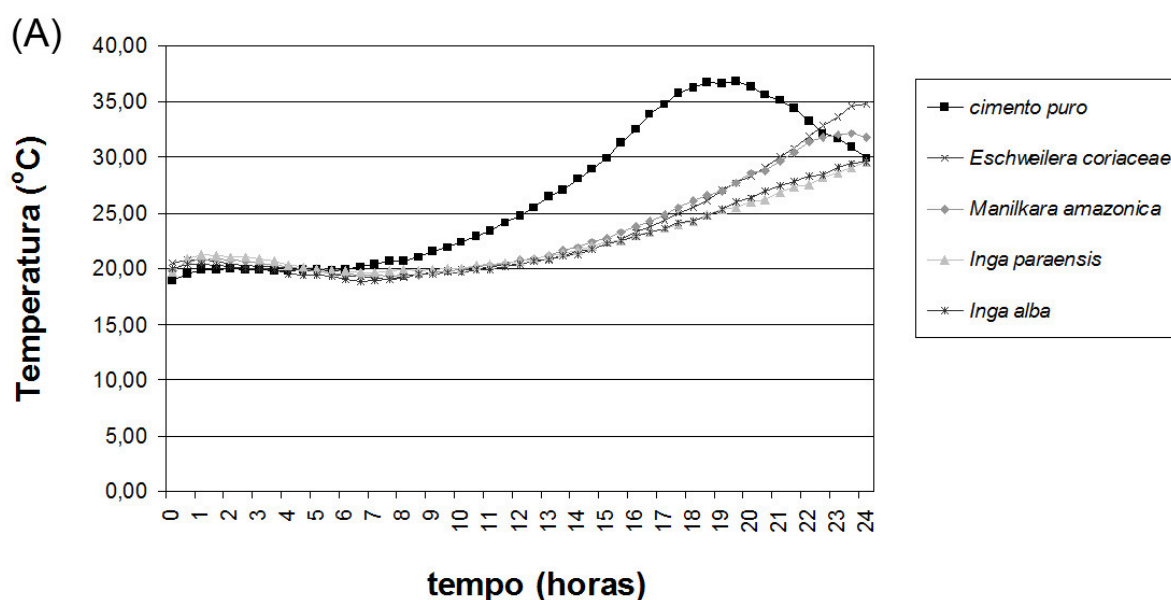


FIGURA 3.2. GRÁFICOS DA REAÇÃO EXOTÉRMICA ENTRE MADEIRA *IN NATURA* E CIMENTO NAS PRIMEIRAS 48 HORAS.

FONTE: O autor (2015)

Duas espécies não atingiram a temperatura máxima da cura dentro das 24 horas iniciais da reação: *Manilkara amazonica* e *Swartzia recurva*. A inibição causada pela presença da espécie *M. amazonica* pode ser consequência do alto teor de extrativo em água fria, indicando grande quantidade de açúcares em sua composição, do alto teor de extrativo em etanol-tolueno, indicando alto teor de ácidos graxos, ou, ainda, do seu baixo pH. Por sua vez, a provável razão para a inibição da espécie *Swartzia recurva* seria a ação dos açúcares hemicelulósicos, indicado pelo alto teor de extrativos em NaOH.

A figura 3.3 apresenta os gráficos entre temperatura (°C) e tempo (horas) da reação exotérmica que ocorreu entre cimento e espécies de madeira após o pré-tratamento com água. A figura 3.3a apresenta a reação para a mistura de cimento puro com água e das misturas entre cimento e madeira das quatro espécies que atingiram o pico de temperatura máxima nas primeiras 24 horas. A figura 3.3b apresenta as curvas para as demais quatro espécies que apresentaram seu pico de temperatura máxima entre 24 e 48 horas após a mistura.



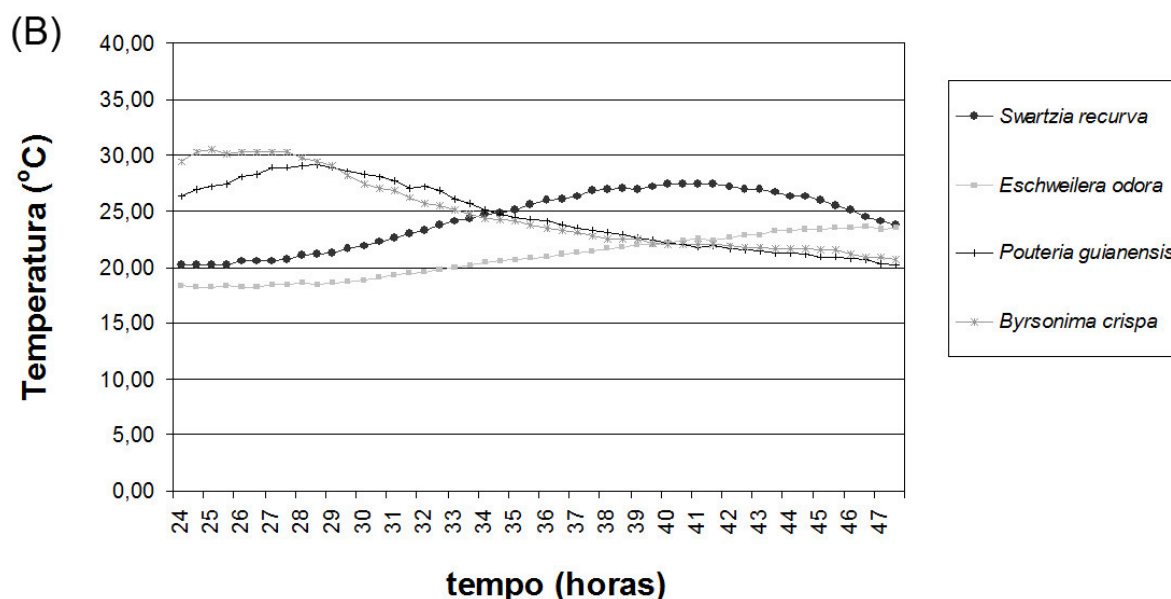


FIGURA 3.3. GRÁFICOS DA REAÇÃO EXOTÉRMICA ENTRE CIMENTO E MADEIRA PRÉ-TRATADA EM ÁGUA FRIA NAS PRIMEIRAS 48 HORAS
 FONTE: O autor (2015)

As curvas de hidratação das misturas antes e depois do pré-tratamento da madeira em água fria apresentaram características diferentes. A mistura com a espécie *Manilkara amazonica* teve seu tempo para se atingir a temperatura máxima reduzido para as primeiras 24 horas. Isso indica que a inibição da madeira *in natura* ocorreu devido aos açúcares solúveis em água. Contudo, o tratamento com água fria não tiveram efeito na compatibilidade da espécie *Swartzia recurva*, que confirma a teoria da inibição pelos açúcares derivados da degradação da hemicelulose.

O tratamento em água fria da espécie *Eschweilera odora* agiu negativamente na compatibilidade da espécie, mesmo que esta apresente um alto teor de extrativo em água fria e, teoricamente, o pré-tratamento diminuiria a inibição, assim como ocorreu com a *M. amazonica*. Pode haver duas possíveis explicações para este comportamento: 1. A madeira utilizada no teste após imersão de água pode ter sido retirada de uma área de maior concentração de extrativos, como o cerne, do que o da madeira utilizada *in natura*; 2. O tempo de imersão não foi o suficiente para eliminar os açúcares, estimulando apenas que os extrativos migrassem para a superfície e durante o processo de moagem, a parte com maior concentração de extrativos foi utilizada.

O pico da reação também foi levemente retardado para as misturas com as espécies *Pouteria guianensis* e *Byrsonima crista*. Entretanto, a razão para este atraso pode ser a composição do cimento utilizado que atingiu menor temperatura de reação e levou um tempo mais longo do que o cimento utilizado como referência para o teste com espécies *in natura*.

3.3.4 . Índices de inibição

A figura 3.4 apresenta os valores de T_R que representa a relação entre o tempo para se atingir a temperatura máxima das misturas em comparação com a reação do cimento puro

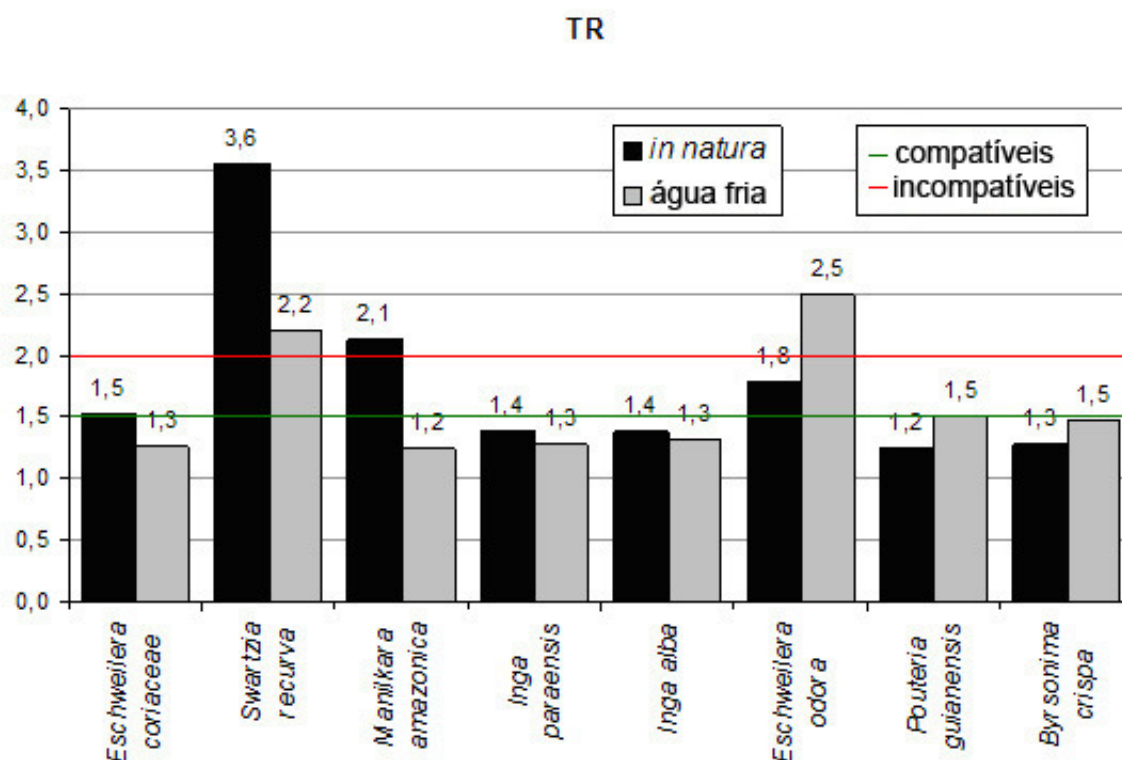


FIGURA 3.4. VALORES DE T_R PARA A MISTURA DE OITO ESPÉCIES TROPICAIS E O CIMENTO PORTLAND TIPO II ANTES E DEPOIS DO TRATAMENTO COM ÁGUA FRIA.

FONTE: O autor (2015)

O teste T_R considera apenas o quanto a mistura de madeira atrasa o alcançar da temperatura máxima da reação exotérmica da hidratação do cimento. Considerando o uso da madeira *in natura*, sem nenhum pré-tratamento, as espécies *Swartzia recurva* e *Manilkara amazonica* foram consideradas incompatíveis com o

cimento Portland tipo II por apresentarem um valor acima de 2 (3,6 e 2,1 respectivamente). As espécies *Eschweilera coriacea* e *Eschweilera odora* apresentam compatibilidade moderada, enquanto que as demais espécies estudadas apresentaram valores abaixo de 1,5, que as classifica como madeiras compatíveis.

As mesmas espécies apresentaram comportamentos diferentes após sofrerem um pré-tratamento de imersão em água fria por 7 dias. Embora houve uma redução no valor de T_R (de 3,6 para 2,2), a espécie *Swartzia recurva* continuou sendo considerada incompatível. Contudo a espécie *Eschweilera odora* apresentou um valor maior para as partículas tratadas (2,5) do que para as *in natura* (1,8). Um comportamento semelhante ocorreu também com as espécies *Pouteria guianensis* (1,5) e *Byrsonima crissa* (1,5), fazendo com que as espécies pré-tratadas passassem a ser classificadas apenas como moderadamente compatíveis.

A figura 3.5 apresenta os valores encontrados para o fator- C_A para as espécies tropicais *in natura* e após extração pelo método da água fria.

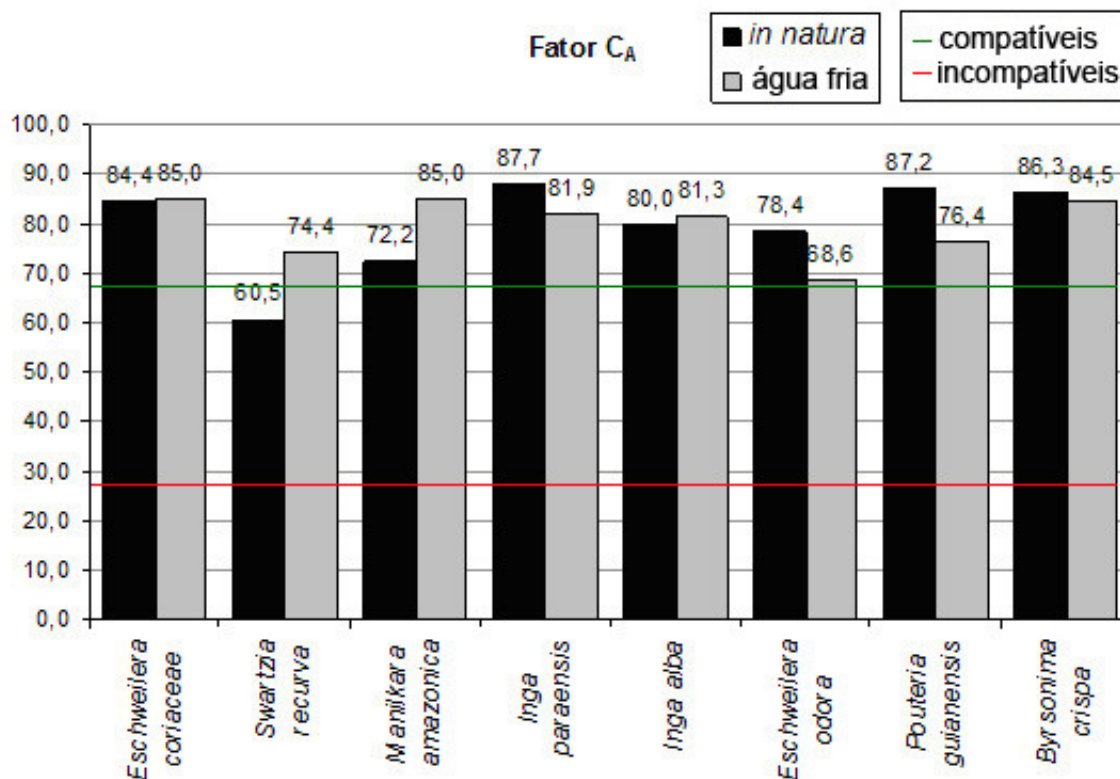


FIGURA 3.5. VALORES DE FATOR- C_A PARA A MISTURA DE OITO ESPÉCIES TROPICAIS E O CIMENTO PORTLAND TIPO II ANTES E DEPOIS DO TRATAMENTO COM ÁGUA FRIA.

FONTE: O autor (2015)

O método do fator- C_A foi menos sensível do que o T_R . Segundo essa metodologia, apenas a madeira *in natura* da espécie *Swartzia recurva* apresentou valores baixo de 68%, o que a considera uma espécie moderadamente compatível com o cimento, sendo as demais consideradas compatíveis. O comportamento observado nas espécies *Eschweilera odora*, *Pouteria guianensis* e *Byrsonima crissa* para o teste T_R foi confirmado com o fator- C_A . Valores *in natura* foram superiores aos encontrados nas partículas pré-tratada com água fria. Sendo que para a espécie *Eschweilera odora* o fator- C_A foi reduzido para 68,6%, um valor muito próximo ao limite que indicaria um pré-tratamento para espécie, porém bem acima do valor que a consideraria incompatível (abaixo de 28%).

A figura 3.6 apresenta os valores encontrados para o índice de inibição (II) sugerido por Hofstrand *et al.* (1984) que leva em consideração a diferença entre temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$), o tempo para atingi-la (h) e a intensidade de ganho de temperatura em uma hora ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) para as misturas de cimento com espécies tropicais comparadas com a curva exotérmica do cimento puro.

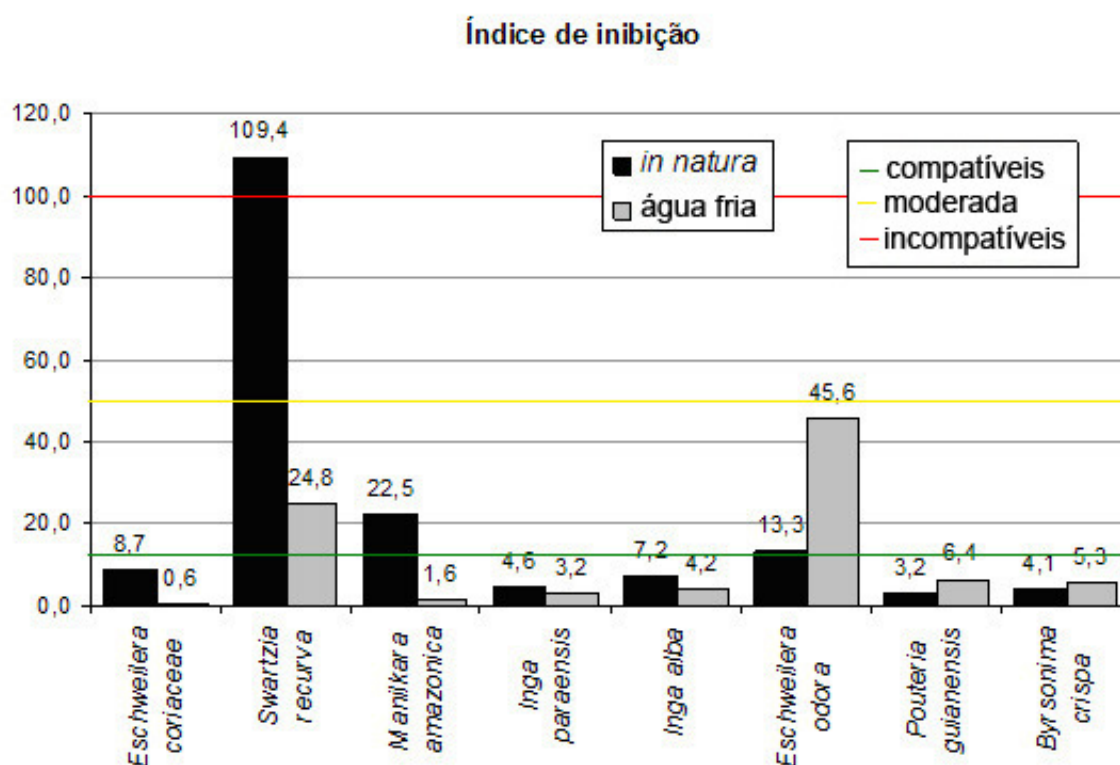


FIGURA 3.6. VALORES DE II PARA A MISTURA DE OITO ESPÉCIES TROPICAIS E O CIMENTO PORTLAND TIPO II ANTES E DEPOIS DO TRATAMENTO COM ÁGUA FRIA.

FONTE: O autor (2015)

O índice de inibição indicou que a espécie *Swartzia recurva* apresenta um valor acima de 100 que a classifica como de extrema inibição (109,4). As espécies *Manilkara amazonica* e *Eschweilera odora* foram consideradas como moderadamente inibidoras apresentando valores entre 10 e 50 quando não sofrem pré-tratamentos (22,5 e 13,3, respectivamente). Após a imersão em água fria por 7 dias, o índice de inibição da espécie *Swartzia recurva* foi reduzido para 24,8 mudando sua classificação de extremamente inibitória para moderadamente compatível. O tratamento com água fria também mostrou-se eficiente para a madeira de *Manilkara amazonica*, tendo seu índice de inibição reduzido para apenas 1,6, o que torna a madeira a ser classificada como de baixa inibição ao cimento.

Assim como nos demais testes, o índice de inibição confirmou o comportamento das espécies *Eschweilera odora*, *Pouteria guianensis* e *Byrsonima crispera* em que a madeira *in natura* apresenta menor inibição do que a madeira após tratamento com água fria. Sendo que o efeito foi mais evidente para a espécie *Eschweilera odora* que após o pré-tratamento apresentou um aumento no índice de 13,3 para 45,6, contudo, a alteração não chegou a ser suficiente para mudar a classificação de inibição moderada para as madeiras com valores de II dentro dos limites de 10 e 50.

Independente do método utilizado para se determinar o grau de inibição à cura do cimento pela madeira *in natura* e após extração em água fria, pode-se observar que não existe uma relação direta com a quantidade de extrativos solúveis em água. Por exemplo, as porcentagens de extrativos solúveis em água fria das espécies *Eschweilera coriacea* e *Swartzia recurva* são similares (2,04 e 2,03%, respectivamente), porém o efeito do tratamento foi muito mais evidente na redução da inibição de partículas de *Swartzia recurva*, o que demonstra a necessidade de se conhecer mais do que a quantidade de extrativos, mas também o tipo de substância presente na madeira.

3.3.5 . Correlação linear de Pearson

A tabela 3.5 apresenta os valores de correlação linear Pearson entre os valores das análises químicas das madeiras e seus respectivos índices de compatibilidade com a cura do cimento.

TABELA 3.5. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE ANÁLISES QUÍMICAS DAS MADEIRAS E OS TESTES DE COMPATIBILIDADE ENTRE MADEIRA-CIMENTO

	Etanol- tolueno	Água fria	Água quente	1% NaOH	Teor de cinzas	pH 2h	pH 24h
T_R	0,3162 (0,4454)	0,3036 (0,4648)	-0,0843 (0,8426)	0,4504 (0,2628)	-0,1749 (0,6786)	0,1032 (0,8078)	-0,3280 (0,4277)
Fator	-0,3174	-0,3487	0,1537	-0,3277	0,2899	0,0334	0,4567
C_A	(0,4436)	(0,3973)	(0,7164)	(0,4282)	(0,4861)	(0,9374)	(0,2553)
II	0,1565 (0,7114)	0,1382 (0,7442)	-0,1183 (0,7802)	0,4570 (0,2549)	-0,1402 (0,7405)	0,2226 (0,5962)	-0,1502 (0,7226)

SEND0: Valores entre parênteses relativos ao valor-P; * Significativo ao nível de 5% de significância
 FONTE: O autor (2015)

Não foi possível determinar uma correlação significativa entre a quantidade de extrativo da madeira, em qualquer método de extração estudado, e a inibição à cura da cimento, independente da metodologia usada para sua determinação. Cada método é responsável pela extração de um grupo de componentes que podem afetar a compatibilidade e por isso, mais do que a porcentagem de extrativos totais, é importante correlacionar componentes específicos.

A tabela 3.6 apresenta as correlações lineares entre os índices de inibição das madeiras após período de imersão de 7 dias em água e suas respectivas composições de monossacarídeos.

TABELA 3.6. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE QUANTIDADE DE MONOSSACARÍDEOS PRESENTE NAS MADEIRAS E OS TESTES DE COMPATIBILIDADE ENTRE MADEIRA-CIMENTO

	mannose	glucose	arabinose	xilose	fucose	galactose	ramnose
T_R	-0,3619 (0,3783)	-0,1078 (0,7994)	0,3169 (0,4444)	0,3625 (0,3775)	-0,1716 (0,6846)	-0,4335 (0,2832)	-0,3670 (0,3712)
Fator	0,1312	0,2428	-0,3163	-0,2671	0,1425	0,2238	0,1026
C_A	(0,7568)	(0,5623)	(0,4454)	(0,5224)	(0,7364)	(0,5941)	(0,8090)
II	-0,3690 (0,3684)	-0,0768 (0,8566)	0,1608 (0,7036)	0,3348 (0,4176)	-0,1028 (0,8087)	-0,3038 (0,4645)	-0,3831 (0,3489)

SEND0: Valores entre parênteses relativos ao valor-P; * Significativo ao nível de 5% de significância
 FONTE: O autor (2015)

Não houve correlação direta entre as porcentagens de monossacarídeos presentes nas madeiras e os resultados para os três testes de compatibilidade aplicados. A falta de correlação pode indicar que não é a quantidade de um tipo específico de monossacarídeo que causa a inibição da cura do cimento, mas sim uma combinação deles.

3.4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados observados neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Dentre as três metodologias para determinar o grau de compatibilidade entre as espécies tropicais e o cimento Portland tipo II, o Índice de Inibição foi o que apresentou resultados mais evidentes e de fácil compreensão.
- A inibição à pega do cimento não pode ser prevista pela exclusiva observância dos valores quantitativos de teores de extrativos ou pela quantificação dos monossacarídeos presentes na madeira.
- Dentre as 8 espécies estudadas, seis foram classificadas como de baixa inibição, o que as tornam viáveis para produção de compósitos madeira cimento. Estas espécies são: *Eschweilera coriaceae*, *Manilkara amazonica*, *Inga paraensis*, *Inga alba*, *Pouteria guianensis* e *Byrsonima crista*.

3.5. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, H. J. B., Mecânica de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**. v. 37. n. 3, p.399- 416, 2007

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7ed. São Paulo, 2002. 28p.

BIRICIK, H., AKOZ, F., BERKTAY, I, TULGAR, A. N., Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. **Cement and Concrete Research**. v. 29. p. 637-643. 1999.

FENGEL, D. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. De Gryter: Berlim. 1989. 601p.

FRYBORT, S., MAURITZ, R., TEISCHINGER, A., MULLER, U. Cement bonded composites - a mechanical review. **Bioresources**, Raleigh, v. 3. n. 2. p. 602-623. 2008

GOOGLE MAPS. Disponível em: <<http://maps.google.com.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

HACHMI, M., MOSLEMI, A.A. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. **Forest Products Journal**, Madison, v. 39, n. 6, p. 55-58, 1989.

HILLIS, W. E. Distribution, properties and formation of some wood extractives. **Wood Science and Technology**. v. 5. p. 272 - 289. 1971

HOFSTRAND, A.D.; MOSLEMI, A.A. e GARCIA J. F. Curing characteristics of wood particle from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, 1984.

JORGE, F. C., PEREIRA, C., FERREIRA, J. M. F. Wood-cement composites: a review. **Holz als Roh und Werkstoff**. v. 62. p.370-377. 2004

LATORRACA J. V.; IWAKIRI S. e LELIS R. C. Efeito Inibidor de cinco espécies Florestais sobre a cura do compósito cimento-madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 6, n. 1, p. 76-82, 1999.

MOSLEMI, A.A., PFISTER S. C. The influence of cement/wood ratio and type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 19, n. 2, p. 165-175 , abr. 1987.

MOSLEMI, A. A. Wood-cement panel products: coming of age. In: MOSLEMI, A. A., HAMEL, M. P. **Fiber and particleboards bonded with inorganic binders**. Forest Product Research Society, Madison, v. 1. p.12-18. 1989.

MOUTINHO, V. H. P. **Caracterização das madeiras conhecidas na Amazônia brasileira como Matá-matá (*Lecythidaceae* fam. A. Rich.)**. Dissertação de mestrado em Ciência e tecnologia da madeira. Universidade Federal de Lavras. 2008. 78p.

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2ª edição. Harlow: Pearson. 2010. 442p.

OKINO, E. Y. A., SOUZA, M. R., SANTANA, M. A. E., ALVES, M. V. S, SOUZA, M. E, TEIXEIRA D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus* spp. cement-bonded particleboards. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdam, v. 27 p.333-338, 2005

OLORUNNISOLA, A. O. Effects of pre-treatment of rattan (*Laccosperma secundiflorum*) on the hydration of Portland cement and the development of a new compatibility index. **Cement and concrete composites**, Amsterdam, v. 30. p. 37-43. 2008

PESCHARD, A., GOVIN, A., POURCHEZ, J., FREDON, E., BERTRAND, L., MAXIMILIEN, S., GUILHOT, B. Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 26. p. 1439-1445. 2006

SIMATUPANG, M. H., SCHMITT, U., KASIM, A. Wood extractives of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and their influences on the setting of the inorganic binder in gypsum-bonded particleboards. **Journal of tropical forest science**. v. 6, n. 3. p. 269 - 285. 1992

SJOSTROM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2ª edição. San Diego: Academic Press. 1993. 301p

SUN, R. C., TOMKINSON, J. Comparative study of organic solvent and water-soluble lipophilic extractives from wheat straw I: yield and chemical composition. **Journal of Wood Science**. v.49. p. 47-52. 2003

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI) **T 280 pm-99**. Acetone extractives of wood and pulp. 1999

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI) **T 207 cm-99**. Water solubility of wood and pulp. 1999

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI) **T 211 om-02**. Ash in wood, pulp, paper and paperbord: combustion at 525°C. 2002

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI) **T 212 om-02**. One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. 2002

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI) **T 252 om-07**. pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard. 2007

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (TAPPI) **T 264 cm-97**. Preparation of wood for chemical analysis. 1997

VILELA, E., DU PASQUIER, B. Determinación del coeficiente de aptitud de un grupo de maderas para su posible aplicación em la fabricación de tableros de papilla de madera y cemento. **Revista Forestal Venezolana**. v.11. n. 16. p. 75-84. 1968

WEATHERWAX, R. C.; TARKOW, H. Effect of wood on setting of portland cement. **Forest product journal**, Madison, v. 12. p. 567-570. 1964

WEI, Y. M., TOMITA, B., HIRAMATSU, Y., MIYATAKE, A., FUJII, T. Study of hydration behaviors of wood-cement mixtures: compatibility of cement mixed with wood fiber strand obtained by water-vapor explosion process. **Journal of Wood Science**. v. 48. p.365-373. 2002

YASUDA, S., IMA, K., MATSUSHITA, Y. Manufacture of wood-cement boards VII: cement-hardening inhibitory compounds of hannoki (Japanese alder, *Alnus japonica* Steud.). **Journal of Wood Science**. v. 48, p. 242-244. 2002

4. PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Em 2009, a extração de madeira em tora na região da Amazônia Legal foi de aproximadamente 14,2 milhões de metros cúbicos, das quais, resultaram em 5,8 milhões de metros cúbicos de madeira processada (serrada, laminados, compensados e produtos beneficiados). Naquele ano, este tipo de indústria na região foi responsável pela geração de aproximadamente 204 mil empregos e de uma receita bruta de cerca de R\$4,9 bilhões. Porém o rendimento médio do processamento na região é de apenas 41% e dentre o material não aproveitado pela indústria madeireira, 9% do volume foi queimado e 16% simplesmente abandonado como entulho (PEREIRA *et al.*, 2010).

Compósito madeira-cimento é um material que, além de possuir um grande potencial para aplicações na construção civil, apresenta ainda a possibilidade de utilização de madeira de descarte como matéria prima. Em locais de clima úmido e quente, os compósitos de madeira-cimento tornam-se materiais de construção ainda mais atrativos devido à superfície resistente ao fogo e ao ataque de cupins e fungos apodrecedores, sem comprometer a trabalhabilidade (WOLF; GJINOLLI, 1997).

Um dos métodos mais tradicionais de produção deste tipo de painéis é o método *BISON*. Em 1973, a empresa suíça *Durisol* foi a primeira a desenvolver um processo de produção de painéis madeira-cimento de alta massa específica. Um ano depois, a empresa decidiu oferecer licenças internacionais para produção deste tipo de painel com um acordo com a empresa alemã *Bisonwerke* que manufaturava e vendia plantas de fábricas. Porém o custo de implementação de uma fábrica deste tipo pode ser alto. Em um levantamento realizado pelo governo canadense em 1987, o custo apenas do maquinário envolvido em uma planta *BISON* chegava em torno de 7 milhões e meio de dólares (CANADIAN FOREST SERVICE, 1987).

Buscando uma alternativa mais econômica, Parchen (2012) sugeriu o uso do método de adensamento por vibro-compactação, utilizado tradicionalmente na produção de blocos de concreto para manufatura de compósitos madeira-cimento. Neste processo, o adensamento ocorre em uma mesa vibratória que pode ser montada e operada de maneira simples e barata, dispensando a aquisição de

prensa e outros equipamentos industriais utilizados pelos processos clássicos de produção.

O objetivo deste capítulo foi avaliar a possibilidade de produção de compósitos madeira-cimento produzidos pelo método de adensamento por vibro-compactação utilizando madeiras de costaneira de 8 diferentes espécies da Amazônia usualmente consideradas resíduos de serrarias.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas oito espécies de madeira tropical nesta pesquisa, indicadas na tabela 4.1, procedente da Reserva Biológica do Cuieiras, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, situada cerca de 60 km a noroeste de Manaus, estado do Amazonas.

TABELA 4.1. LISTA DE ESPÉCIES TROPICAIS UTILIZADAS NA PESQUISA

	Nome popular	Nome científico
1	Piãozinho	<i>Eschweilera coriacea</i> (A. DC. Mori.)
2	Muiragiboia	<i>Swartzia recurva</i> Poepp.
3	Abiurana	<i>Manilkara amazonica</i> (Huber)
4	Inga vermelha	<i>Inga paraensis</i> Ducke
5	Inga vermelha	<i>Inga alba</i> (Sw.) Willd
6	Matamata	<i>Eschweilera odora</i> (Poepp.) Miers
7	Abiurana	<i>Pouteria guianensis</i> Aubl.
8	Murici	<i>Byrsonima crispera</i> Juss

FONTE: O autor (2015)

O material foi enviado para o Laboratório de Painéis de Madeira, da Universidade Federal do Paraná - UFPR, em forma de costaneiras. As costaneiras foram descascadas e seccionadas. Foram separadas 10 amostras de cada espécie para a determinação da massa específica básica. Os procedimentos referentes à coleta de dados do volume saturado e da massa seca seguiram as recomendações da norma COPANT 461/1972.

A massa específica básica foi então calculada através da seguinte fórmula:

$$\rho_{básica} = \frac{P_{0\%}}{V_{saturado}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

ONDE: $\rho_{básica}$ corresponde a massa específica básica (g/cm³), $P_{0\%}$ é o peso seco da amostra (g) e $V_{saturado}$ é o volume da amostra saturada (cm³)

4.2.1. Preparo das partículas

Devido a alta massa específica das espécies, as madeiras seccionadas foram mantidas submersas em água fria por um período de 7 dias para que fosse possível a geração de partículas através do picador de disco sem danificar as facas do equipamento. Durante o período de imersão, a água foi trocada diariamente para estimular a extração de substâncias que poderiam vir a ser deletérias à cura do cimento.

As partículas geradas no picador de disco foram então secas em duas etapas antes de serem reprocessadas no moinho de martelo. As partículas saturadas foram inicialmente expostas ao sol para a redução do teor de umidade. A segunda etapa foi conduzida em estufa convencional com circulação de ar forçada a temperatura de 80°C por um período de 24 horas, reduzindo o teor de umidade para aproximadamente 3%.

Após a moagem, as partículas foram classificadas por peneiramento automático. Foram utilizadas peneiras de 8 e 14 *mesh*, que correspondem a aberturas de 2,36 e 1,40mm, respectivamente. Os painéis foram produzidos com as partículas retidas entre as peneiras.

4.2.2. Geometria das partículas

Para a determinação da geometria das partículas foi medido o comprimento, largura e espessura de 100 partículas por espécie com o auxílio de um paquímetro digital. Com os resultados dessas medições foi possível calcular o Índice de Esbeltez (IdE), calculado pela relação comprimento e espessura das partículas, e a Razão de Planicidade (RP), obtido pela relação largura e espessura. A área superficial das partículas foi calculada pelo método sugerido por Moslemi (1974):

$$a' = \frac{2 \times ((e \times c) + (l \times c) + (e \times l))}{c \times l \times e \times d} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

SEND0: a' a área superficial em $\text{cm}^2\text{/g}$; e , l e c respectivamente a espessura, largura e comprimento das partículas em cm; e d a massa específica da madeira em g/cm^3

4.2.3. Manufatura dos compósitos

O método empregado para manufatura dos corpos de prova foi o de adensamento por vibro-compactação sugerido por Parchen (2012). O cimento utilizado neste experimento foi o Portland tipo CP II-Z. A mistura de madeira:cimento seguiu a relação 1:2,75 (baseado no peso seco das partículas).

A quantidade de água utilizada nas misturas foi adaptada da fórmula sugerida por Simatupang (1979) com o acréscimo de 15% a mais de água baseado no peso seco do cimento, e resultando na seguinte equação:

$$H_2O = (C \times 0,50) + (M \times (0,3 - TU\%)) \text{ (g)}$$

SEND0: C o peso do cimento (g), M o peso das partículas (g) e TU% o teor de umidade das partículas.

Esta adaptação fez-se necessária devido ao fato de que a metodologia do adensamento por vibro-compactação não envolve pressão, então a umidade presente nas partículas não é extraída fisicamente para ser utilizada como água de reação na cura do cimento.

O aditivo químico cloreto de cálcio (CaCl_2) foi adicionado à mistura, na quantidade de 3% em relação ao peso seco do cimento, como um acelerador da pega do cimento. A figura 4.1 apresenta as quantidades dos materiais usadas nas misturas.

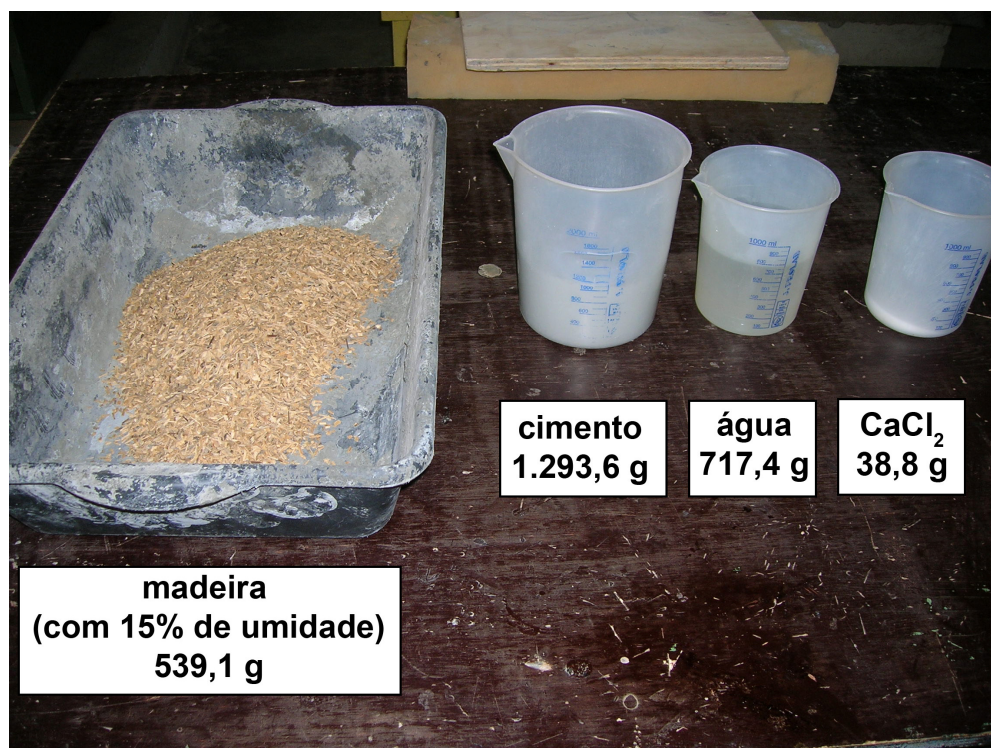


FIGURA 4.1. QUANTIDADES DOS MATERIAIS USADOS NA MISTURA
FONTE: O autor (2015)

Os materiais foram depositados em moldes prismáticos de madeira compensada com 420 mm de comprimento, 70 mm de largura e 15 mm de espessura, como representado na figura 4.2. A quantidade de material depositado em cada molde foi calculada considerando uma massa específica aparente desejada de 1 g/cm^3 .

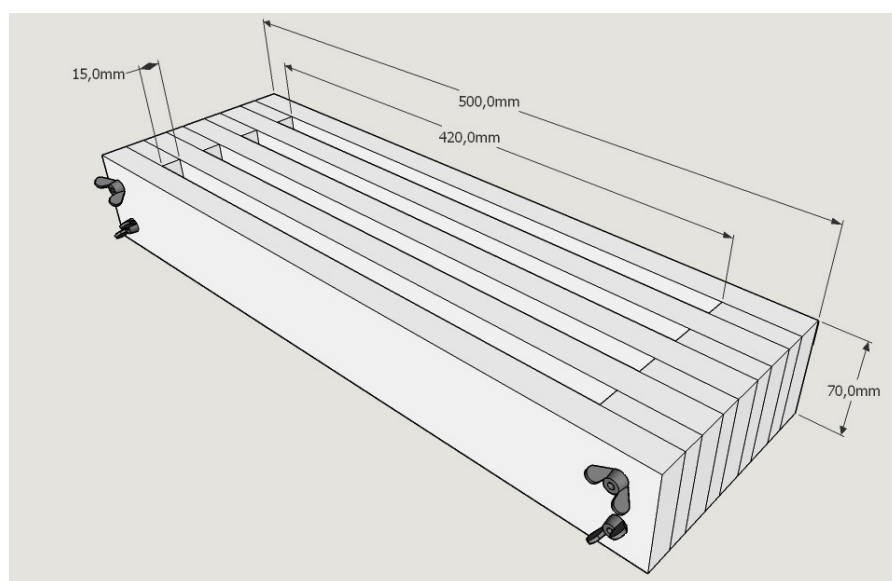


FIGURA 4.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MOLDE PRISMÁTICO
FONTE: O autor (2015)

A mesa vibratória foi montada com um vibrador Würges com carga de impacto vertical equivalente a 220 N e rotação de 3.000 RPM, representado na figura 4.3, acoplado a uma prancha de compensado flexível, como indicado na figura 4.4.

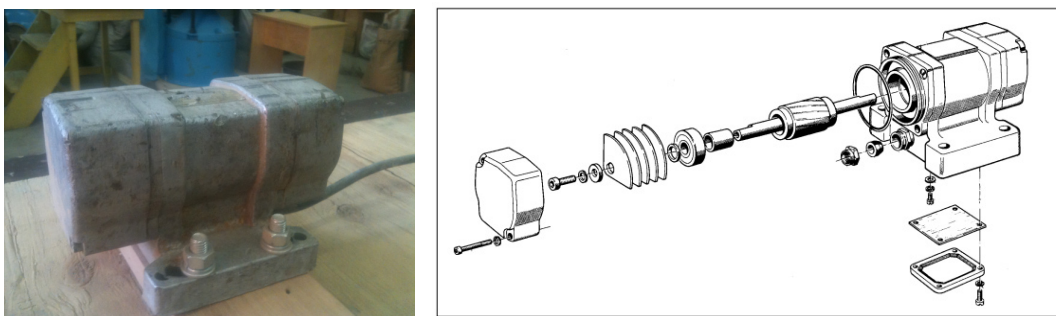


FIGURA 4.3. FOTO E ESQUEMA DO VIBRADOR WÜRGES UTILIZADO NA MESA VIBRATÓRIA
FONTE: O autor (2015)



FIGURA 4.4. MESA VIBRATÓRIA SEM E COM A PRESENÇA DO MOLDE FORMADOR.
FONTE: O autor (2015)

Os moldes totalmente preenchidos com a mistura foram submetidos à vibração por 30 segundos. Devido a ação do adensamento do material por vibro-compactação, a mistura se sedimentou e surgiu novo espaço livre na parte superior do molde. Nova quantidade de material foi depositada e novamente submetido à vibração. Este processo foi repetido até todo o material preparado ser aplicado ou até não haver mais espaço no molde após os 30 segundos de vibração.

A mistura foi mantida dentro do molde por 7 dias. Após esse período, o molde foi desmontado e os corpos de prova mantidos em ar livre no período restante de 28 dias de cura.

Após a cura, os corpos de prova foram cortados com serra diamantada nas dimensões padrões das normas européias EN 310 (1993), EN 317 (1993) e EN 319 (1993).

4.2.4. Determinação das propriedades físicas e mecânicas

a) Absorção de água e Inchamento em espessura

O procedimento adotado para a determinação da absorção de água e inchamento em espessura dos painéis seguiu a norma EN 317 (1993). Foram produzidos 6 corpos de prova com 50 mm de largura e comprimento e 15 mm de espessura para cada tratamento. Os corpos de prova foram então submetidos a imersão em água a 20°C por 2 e 24 horas. A porcentagem de absorção de água do painel foi calculada pela seguinte fórmula:

$$AA = \left(\frac{p_2 - p_1}{p_1} \right) \times 100 \text{ (\%)}$$

ONDE : p1 é peso antes do ensaio e p2 o peso após 2 ou 24 horas do início do ensaio

O inchamento em espessura foi calculado pela fórmula:

$$IE = \left(\frac{t_2 - t_1}{t_1} \right) \times 100 \text{ (\%)}$$

ONDE : t1 é espessura antes do ensaio e t2 a espessura após 2 ou 24 horas do início do ensaio

A espessura dos corpos de prova foram medidas com um micrometro no ponto central da amostra, como representado na figura 4.5.

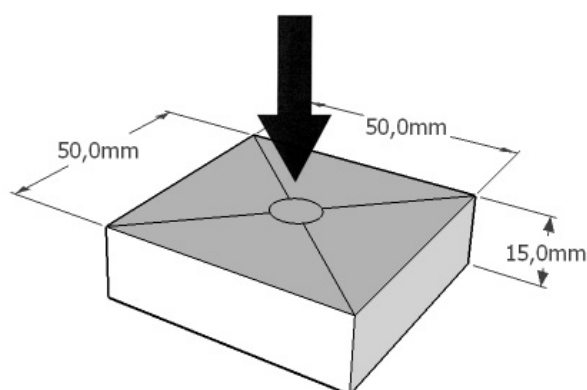


FIGURA 4.5. ESQUEMA PARA MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE ESPESSURA NO CORPO DE PROVA
 FONTE: O autor (2015)

b) Flexão estática

Os corpos de prova foram obtidos nas dimensões de 50 mm de largura, 15 mm de espessura e 350 mm de comprimento para atender as determinações da norma EN 310 (1993).

O módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) foram determinados pela aplicação de uma carga no centro do corpo de prova apoiado em dois pontos, como ilustrado na figura 4.6. Para cada tratamento foram ensaiados um mínimo de 8 corpos de prova, que atende o requisito mínimo determinado pela norma EN 326-1 (1994).

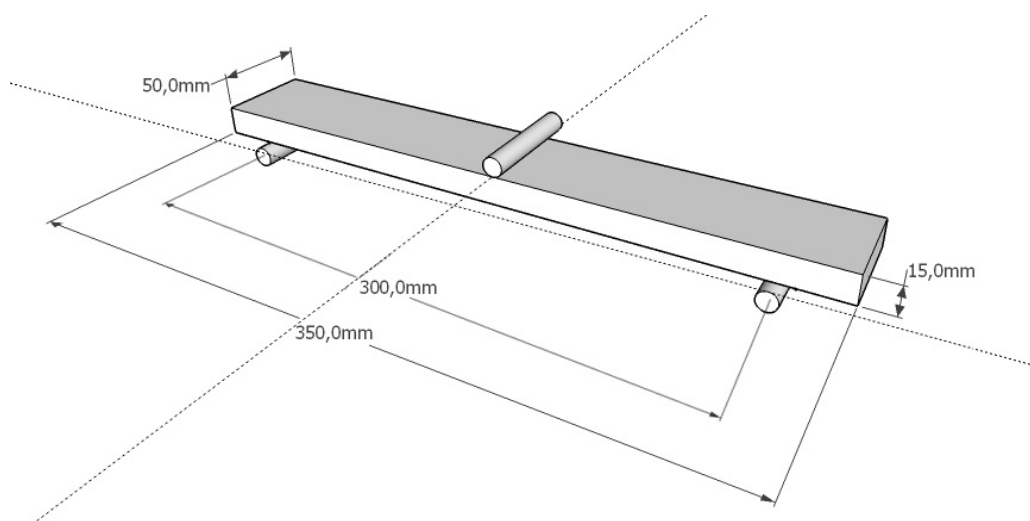


FIGURA 4.6. ESQUEMA DE POSICIONAMENTO DO CORPO DE PROVA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA
 FONTE: O autor (2015)

O cálculo do MOE se deu pela equação:

$$MOE = \left(\frac{l_1^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times w \times t^3 \times (a_2 - a_1)} \right) \text{ (MPa)}$$

Onde:

l_1 é a distância entre os centros dos suportes (mm);

w é a largura do corpo de prova (mm);

t é a espessura do corpo de prova (mm);

$F_2 - F_1$ é o aumento da carga na parte linear da curva de deflexão (N);

$a_2 - a_1$ é o aumento da deflexão no meio do comprimento do corpo de prova (correspondente a $F_2 - F_1$) (mm).

O MOR foi calculado pela fórmula:

$$MOR = \left(\frac{3 \times F_{\max} \times l_1}{2 \times w \times t^2} \right) \text{ (MPa)}$$

Onde:

F_{\max} é a carga máxima em newtons;

l_1 é o vão entre os centros dos suportes (mm);

b é a largura do corpo de prova (mm);

t é a espessura do corpo de prova (mm).

c) Ligação Interna

Corpos de prova com uma área superficial de 50 mm² foram colados com adesivo tipo PVA em blocos de madeira com área superficial de 75 mm² e submetidos ao teste normatizado pela EN 319 (1993), como representado na figura 4.7.

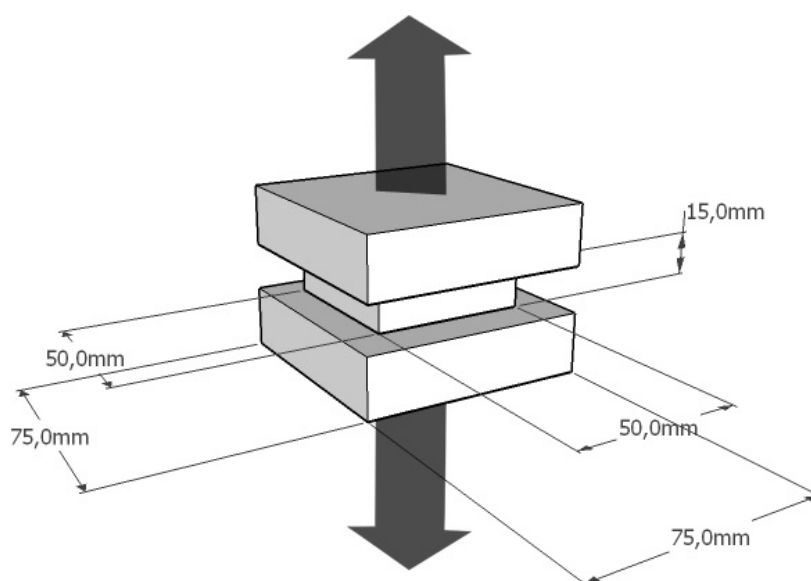


FIGURA 4.7. REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIOS DE LIGAÇÃO INTERNA
 FONTE: O autor (2015)

O cálculo do valor seguiu a fórmula:

$$f_{T\perp} = \left(\frac{F_{\max}}{a \times b} \right) \text{ (MPa)}$$

ONDE: ($f_{T\perp}$) é a ligação interna, F_{\max} é a carga de ruptura em newtons; a e b são o comprimento e a largura do corpo de prova em mm.

A ligação interna foi a média aritmética dos resultados de 8 corpos de prova para cada tratamento.

d) Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, foram produzidos 7 corpos de prova cilíndricos utilizando moldes produzidos com canos PVC de 40 mm de diâmetro externo e 80mm de comprimento, como ilustrado na figura 4.8.

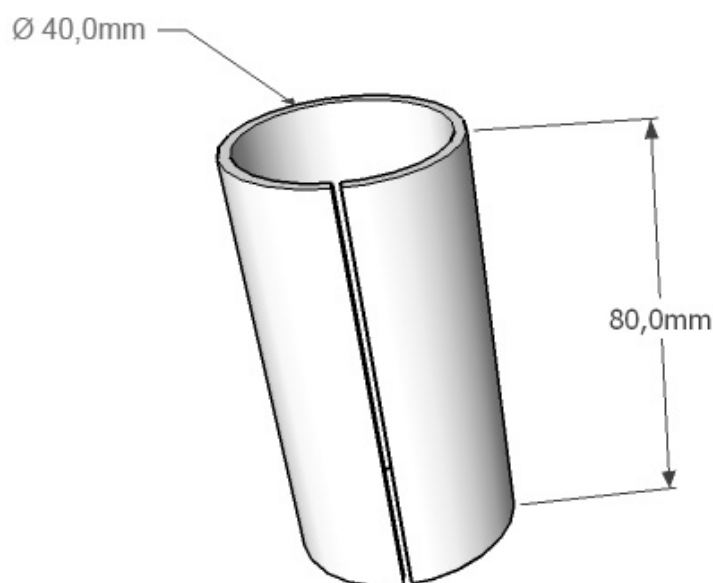


FIGURA 4.8. ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS MOLDES PARA CONFEÇÃO DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

FONTE: O autor (2015)

Após 28 dias de cura, os corpos de prova foram ensaiados em uma máquina universal de ensaios com velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s, como indicado pela norma NBR 7215 (ABNT, 1996).

4.2.5 - Análise estatística

Todos os testes estatísticos foram realizados com auxílio do *software* Statgraphics Centurion XV.

a) Normalização

A normalidade dos dados foi caracterizada pelos testes Skewness e Kurtosis. Para as seqüências de dados que estes testes não observaram uma distribuição normal, foi aplicado o método de Box-Cox de transformação, utilizando o λ mais adequado para cada caso.

b) Coeficiente de correlação linear de Pearson

É a medida que indica o grau de associação entre duas variáveis aleatórias que possuem relação linear de causa e efeito entre si. A correlação Pearson varia de -1 a 1, sendo que o valor igual a zero revela a ausência de relação entre as variáveis. O sinal positivo indica uma relação direta, enquanto que o negativo, uma relação inversa.

Foi determinada a correlação de Pearson entre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos e a massa específica básica da madeira utilizada, a área superficial das partículas e os índices de compatibilidade entre a madeira tratada com água fria e o cimento Portland tipo II determinados no capítulo 3. Também foi determinada a correlação entre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos e a quantidade de monossacarídeos presentes nas madeiras determinada no capítulo 3.

c) Análise de Variância Multifatorial

Os compósitos foram divididos em classes de acordo com suas massas específicas (abaixo de 1 g/cm^3 , entre 1 e $1,1 \text{ g/cm}^3$ e acima de $1,1 \text{ g/cm}^3$). Os dados normalizados foram testados por Análise de Variância Multifatorial e pelo teste de comparação de média Tukey ao nível de probabilidade de 95%, dentro de sua respectiva classe de massa específica.

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1. Granulometria das partículas

A figura 4.9 apresenta as imagens das partículas das 8 espécies tropicais estudadas após passagem no moinho de martelo e na peneira automática.

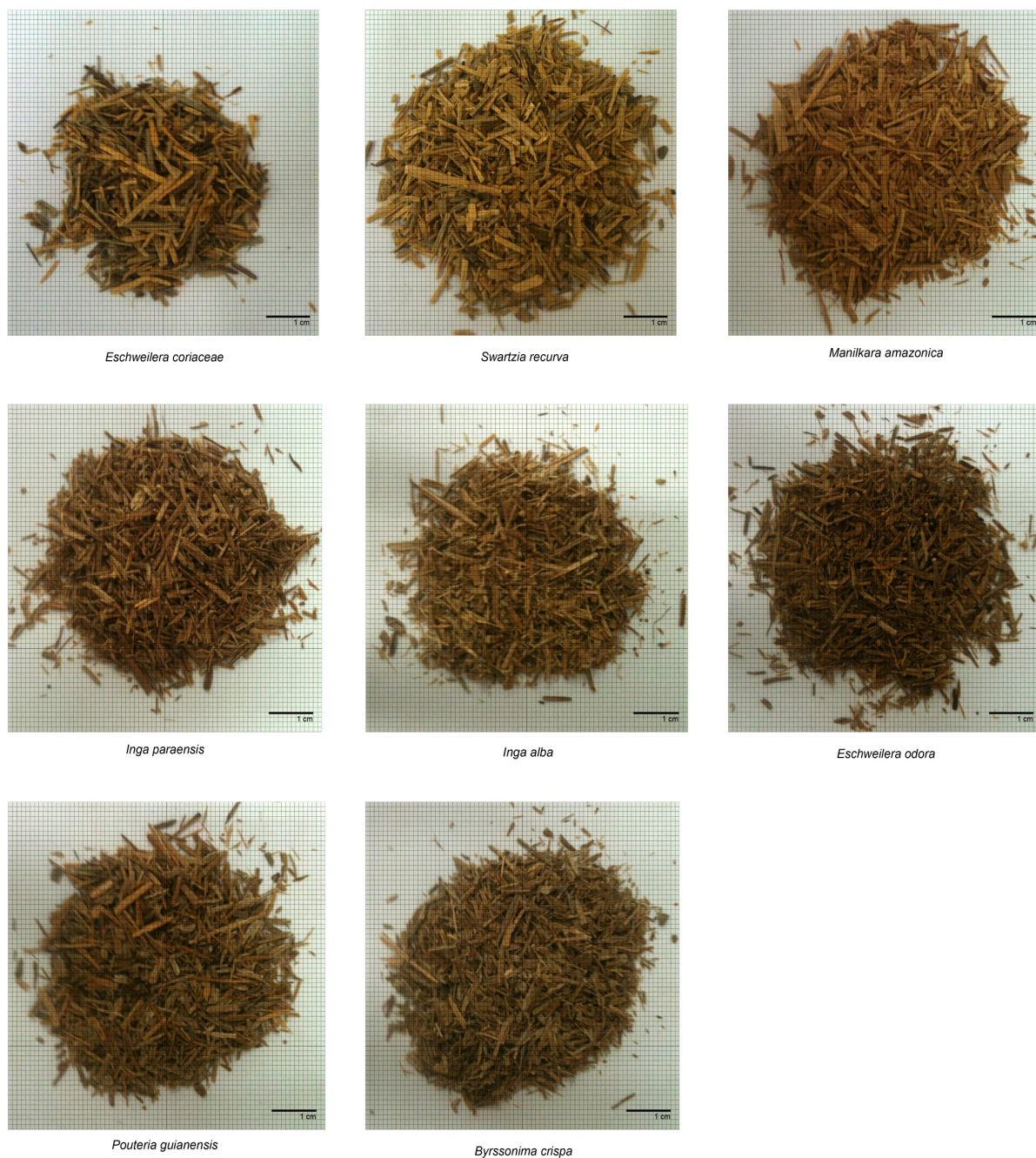


FIGURA 4.9. FOTOS DAS PARTÍCULAS DAS OITO ESPÉCIES TROPICAIS UTILIZADAS NA FABRICAÇÃO DAS CHAPAS DE MADEIRA-CIMENTO

FONTE: O autor (2015)

A tabela 4.2 apresenta os valores da massa específica básica das espécies, dados relativos a geometria da partícula e suas respectivas áreas superficiais.

TABELA 4.2. VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA, ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS DE MADEIRAS DAS ESPÉCIES TROPICAIS.

Espécie	Dens. básica (g/cm ³)	IdE	RP	AS (cm ² /g)
<i>Eschweilera coriacea</i>	0,73 ^{ab} (1,66)	16,90 ^{ab} (61,09)	3,01 ^{ab} (47,96)	84,2 ^c (32,94)
<i>Swartzia recurva</i>	0,80 ^a (5,62)	18,50 ^{ab} (68,59)	3,08 ^{ab} (62,20)	85,5 ^c (46,58)
<i>Manilkara amazonica</i>	0,80 ^a (4,21)	17,67 ^{ab} (51,09)	2,69 ^{ab} (41,34)	77,9 ^c (36,65)
<i>Inga paraensis</i>	0,63 ^{bc} (8,31)	21,40 ^a (63,02)	3,26 ^a (48,10)	108,5 ^b (37,92)
<i>Inga alba</i>	0,57 ^c (9,89)	18,21 ^{ab} (55,31)	3,24 ^a (59,33)	133,9 ^a (38,60)
<i>Eschweilera odora</i>	0,69 ^{abc} (10,76)	19,85 ^a (51,94)	2,85 ^{ab} (46,38)	105,2 ^b (40,76)
<i>Pouteria guianensis</i>	0,68 ^{bc} (8,91)	14,43 ^b (41,26)	2,44 ^b (42,69)	84,5 ^c (25,56)
<i>Byrsonima crispa</i>	0,72 ^{ab} (11,31)	17,06 ^{ab} (60,99)	3,37 ^a (50,57)	103,4 ^b (43,47)

SENDON: IdE, o índice de esbeltez; RP a razão de planicidade; e AS a área superficial. Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

As espécies *Swartzia recurva* e *Manilkara amazonica* apresentaram o maior valor médio relativo a massa específica básica da madeira (0,8 g/cm³) sendo estatisticamente superior aos das espécies *Inga paraensis*, *Inga alba* e *Pouteria guianensis*. A massa específica da madeira está correlacionada com o volume de material orgânico da mistura, uma vez que a proporção madeira-cimento de 1 para 2,75 é relativa ao peso seco dos materiais. Assim, madeiras mais leves geram um maior volume de partículas do que as mais densas.

Quando se usa o método tradicional de prensa de pratos para a formação do compósito, o volume não é um fator relevante, pois a mistura é submetida a uma pressão que determina o volume final do compósito independente da altura do colchão inicial. Por isso, a alta massa específica básica da madeira afeta de maneira

direta a massa específica do produto final. Vilela e Du Pasquier (1968) chegaram a recomendar que madeiras com massa específica acima de $0,7 \text{ g/cm}^3$ não deveriam ser utilizadas na produção de painéis madeira-cimento, pois a maior massa específica do painel poderia acarretar em problemas para seu transporte e manuseio. Considerando este tipo de classificação, as espécies aptas para a produção tradicional de painéis madeira cimento seriam as *Inga paraensis*, *Inga alba*, *Eschweilera odora* e *Pouteria guianensis*.

O índice de esbeltez é um parâmetro que pode exercer influência sobre a área de contato entre partículas e, conseqüentemente, propriedades mecânicas. Partículas longas e finas, ou seja com maior valor de índice de esbeltez tendem a produzir painéis com maior resistência estática e maior estabilidade dimensional (VITAL *et al.*, 1992). As partículas produzidas das espécies *Inga paraensis* e *Eschweilera odora* apresentaram valores médios de índice de esbeltez estatisticamente superior aos das partículas de madeira de *Pouteria guianensis*.

A razão de planicidade é um fator importante na formação do colchão na produção de aglomerados que utilizam resinas fenólicas, por estar ligado ao volume de ar. Fator este que também é importante de ser observado nos painéis madeira-cimento. As partículas de *Inga paraensis*, *Inga alba* e *Byrsonima crispera* tiveram valores médios de razão de planicidade estatisticamente superior ao das partículas de *Pouteria guianensis*.

Em relação à área superficial média das partículas, as espécies podem ser classificadas em três diferentes categorias. As partículas de *Inga alba* apresentaram um valor médio de área superficial ($133,9 \text{ cm}^2/\text{g}$) estatisticamente superior aos das demais espécies. As partículas das espécies *Inga paraensis*, *Eschweilera odora* e *Byrsonima crispera* apresentaram valores médios de área superficial superior a $100 \text{ cm}^2/\text{g}$, enquanto que as demais espécies (*Eschweilera coriacea*, *Swartzia recurva*, *Manilkara amazonica* e *Pouteria guianensis*) apresentaram valores médios inferiores a este limite.

A tabela 4.3 apresenta os valores de correlação linear Pearson entre características de geometria das partículas.

TABELA 4.3. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE AS VARIÁVEIS DA GEOMETRIA DAS PARTÍCULAS E A MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DA MADEIRA

Variável	IdE	RP	AS
RP	0,5303 (0,1764)	-	-
AS	0,4261 (0,2925)	0,6058 (0,1115)	-
Dens. da madeira	-0,2155 (0,6083)	-0,2969 (0,4752)	-0,8557 (0,0067)*

SENDO: Valores entre parênteses relativos ao valor-P; * Significativo ao nível de 5% de significância
 FONTE: O autor (2015)

A única correlação encontrada foi a relação inversa entre a massa específica básica da madeira e a área superficial das partículas geradas. Assim, as madeiras de maior massa específica (*Eschweilera coriacea*, *Swartzia recurva* e *Manilkara amazonica*) foram as que apresentaram partículas com menor área superficial.

4.3.2. Propriedades físicas dos compósitos

A figura 4.10 apresenta a aparência superficial dos corpos de prova produzidos para cada uma das oito espécies estudadas.

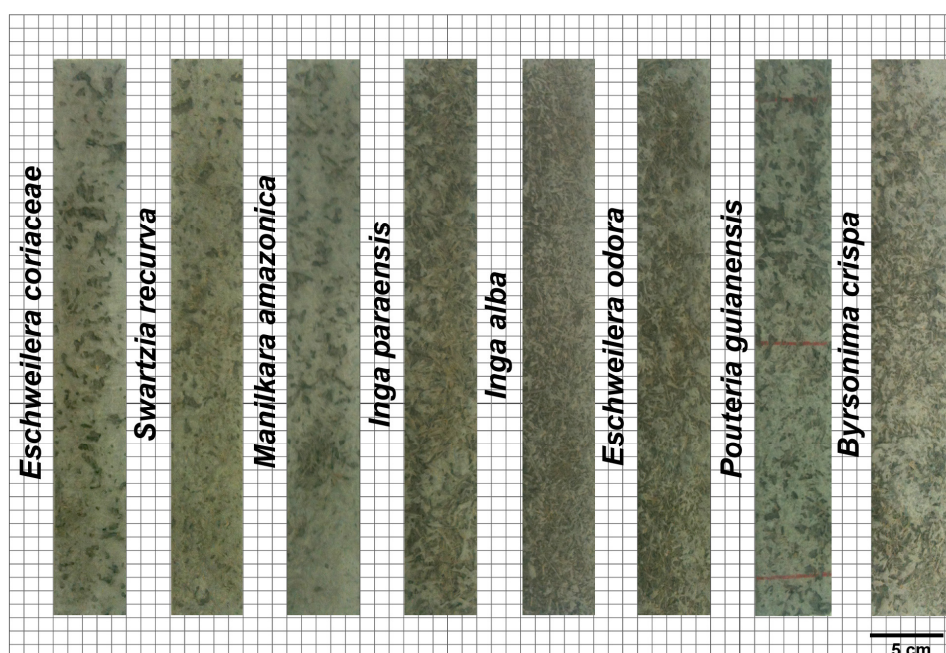


FIGURA 4.10. APARÊNCIA SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA
 FONTE: O autor (2015)

Visualmente é possível observar que os compósitos produzidos com as três espécies de maior massa específica básica (*Eschweilera coriaceae*, *Swartzia recurva* e *Manilkara amazonica*) apresentaram um melhor fechamento superficial com menor porosidade do que os demais tratamentos. O efeito inverso também foi observado, ou seja, os dois compósitos mais porosos foram produzidos com as espécies de menor massa específica básica (*Inga paraensis* e *Inga alba*). Uma possível explicação para este fenômeno é o fato de que partículas produzidas de espécies mais densas possuem uma menor área superficial e consequentemente exigem uma menor quantidade de cimento para sua cobertura. Desta maneira, em compósitos produzidos com partículas de espécies de alta massa específica, há uma maior quantidade de interações de partículas cimento-cimento, criando uma aparência menos porosa. A tabela 4.4 apresenta as propriedades físicas dos compósitos após 28 dias de cura.

TABELA 4.4. PROPRIEDADE FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS.

Espécie	Massa específica (g/cm³)	AA 2h (%)	AA 24h (%)	IE 2h (%)	IE 24h (%)
<i>Eschweilera coriaceae</i>	1,23 (4,23)	14,76 (7,31)	17,13 (8,23)	0,22 (47,67)	0,30 (47,29)
<i>Swartzia recurva</i>	1,14 (4,52)	16,69 (6,98)	19,43 (5,46)	0,36 (52,83)	0,45 (27,74)
<i>Manilkara amazonica</i>	1,17 (4,88)	13,62 (6,66)	15,20 (5,27)	0,26 (35,10)	0,33 (28,59)
<i>Inga paraensis</i>	0,96 (6,63)	22,46 (13,98)	25,25 (14,21)	0,18 (37,70)	0,33 (32,93)
<i>Inga alba</i>	0,90 (5,45)	27,12 (14,57)	29,76 (9,72)	0,19 (40,43)	0,54 (27,70)
<i>Eschweilera odora</i>	0,96 (5,41)	25,22 (9,60)	28,72 (6,59)	0,16 (34,39)	0,31 (58,84)
<i>Pouteria guianensis</i>	1,06 (1,96)	19,79 (7,58)	22,28 (5,59)	0,30 (66,74)	0,41 (49,07)

continua

TABELA 4.4. PROPRIEDADE FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS

Espécie	Massa específica (g/cm ³)	AA 2h (%)	AA 24h (%)	IE 2h (%)	IE 24h (%)
<i>Byrsonima crispera</i>	1,01 (5,50)	20,02 (9,77)	22,72 (9,33)	0,21 (58,10)	0,30 (58,30)

SENDO: AA, absorção de água após 2 ou 24 horas; e IE, o inchamento em espessura após 2 e 24 horas; Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

Apenas os compósitos produzidos com a madeira de *Eschweilera coriacea* apresentaram um valor médio de massa específica similar ao da massa específica nominal (1,2 g/cm³), sendo que compósitos de três espécies (*Inga paraensis*, *Inga alba* e *Eschweilera odora*) apresentaram uma massa específica abaixo de 1 g/cm³. De acordo com a classificação sugerida por Simatupang (1989), compósitos madeira-cimento com massa específica abaixo deste limite podem ser considerados como de média massa específica.

Na tabela 4.5, são apresentadas as correlações das propriedades físicas dos compósitos com a massa específica dos compósitos, a massa específica básica da madeira utilizada na mistura, a área superficial das partículas e os três índices de inibição estudados no capítulo 3.

TABELA 4.5. CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E A MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS E DA MADEIRA E ÁREA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS

Variáveis	ME. do compósito	AA 2h	AA 24h	IE 2h	IE 24h
ME do Compósito	-	-0,9561 (0,0002)*	-0,9457 (0,0004)*	0,5735 (0,1372)	-0,3299 (0,4249)
M. E. da madeira	0,8080 (0,0152)*	-0,8519 (0,0072)*	-0,8293 (0,0109)*	0,6215 (0,1000)	-0,3942 (0,3339)
Área Superficial	-0,08807 (0,0039)*	0,8986 (0,0024)*	0,8813 (0,0038)*	-0,6385 (0,0884)	0,4485 (0,2650)

continua

TABELA 4.5. CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E A MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS E DA MADEIRA E ÁREA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS

Variáveis	conclusão				
	ME. do compósito	AA 2h	AA 24h	IE 2h	IE 24h
Índice de	-0,2328	0,3439	0,3932	-0,0502	-0,0519
Inibição	(0,5790)	(0,4043)	(0,3352)	(0,9060)	(0,9029)
Fator C_A	0,2977	-0,4185	-0,4608	-0,1079	-0,1704
	(0,4739)	(0,3021)	(0,2505)	(0,7993)	(0,6867)
T_R	-0,1406	0,2441	0,2974	0,1355	0,0072
	(0,7399)	(0,5601)	(0,4744)	(0,7491)	(0,9864)

SEND0: ME, massa específica; AA, absorção de água após 2 ou 24 horas; e IE, o inchamento em espessura após 2 e 24 horas; Valores entre parênteses relativos ao valor-P; * Significativo ao nível de 5% de significância

FONTE: O autor (2015)

Há uma correlação direta entre a massa específica final do compósito e a massa específica básica da madeira utilizada para sua produção. Uma vez que a massa específica básica da madeira e a área superficial de suas partículas são correlacionadas, também pode-se afirmar que quanto menor a área superficial das partículas, maior será a massa específica do compósito. Contudo, nenhum dos índices de inibição que a madeira causa na cura inicial do cimento apresentam influência na massa específica do compósito após 28 dias de cura.

A propriedade de absorção de água é inversamente correlacionada com a massa específica do compósito. A correlação também pode ser traçada entre a propriedade e a massa específica da madeira utilizada e a área superficial das partículas. Em compósitos mais densos, há uma maior cobertura das partículas com cimento devido a menor área superficial. Esta cobertura cria uma barreira física que impede a absorção de água pela madeira. Já a propriedade de inchamento em espessura não apresentou correlação com a massa específica do compósito, da madeira utilizada ou com a área superficial das partículas.

Não houve correlação entre as propriedades físicas e os três testes mais utilizados para determinação do grau de inibição que a madeira pode causar à cura do cimento. Porém a falta de relação entre a inibição e as propriedades finais dos

compósitos pode ser relacionada ao efeito acelerador do cloreto de cálcio adicionado à mistura.

As correlações entre as propriedades físicas dos compósitos madeira cimento e a composição dos açúcares encontradas nas madeiras de origem são apresentadas na tabela 4.6.

TABELA 4.6. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE QUANTIDADE DE MONOSSACARÍDEOS PRESENTE NAS MADEIRAS E AS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS

	mannose	glucose	arabinose	xilose	fucose	galactose	ramnose
ME	0,3044 (0,4635)	0,1882 (0,6553)	0,2133 (0,6120)	-0,2806 (0,5008)	-0,4177 (0,3032)	-0,2217 (0,5977)	-0,0157 (0,9705)
AA 2h	-0,2955 (0,4773)	-0,3755 (0,3594)	-0,1274 (0,7638)	0,4106 (0,3122)	0,3791 (0,3544)	0,1666 (0,6933)	-0,0484 (0,9095)
AA 24h	-0,3083 (0,4576)	-0,3627 (0,3772)	-0,1174 (0,7819)	0,4110 (0,3117)	0,3898 (0,3398)	0,1569 (0,7105)	-0,0606 (0,8867)
IE 2h	0,2025 (0,6306)	-0,1500 (0,7230)	0,7724 (0,0247)*	0,0226 (0,9576)	-0,5455 (0,1620)	-0,5634 (0,1459)	0,1253 (0,7674)
IE 24h	-0,1965 (0,6409)	-0,7862 (0,0207)*	0,7192 (0,0444)*	0,6902 (0,0581)	-0,1753 (0,6780)	-0,4545 (0,2579)	-0,01252 (0,7676)

SENDO: Valores entre parênteses relativos ao valor-P; * Significativo ao nível de 5% de significância
 FONTE: O autor (2015)

O inchamento em espessura foi a única propriedade física que apresentou correlação com a composição química dos açúcares das madeiras utilizadas para a produção do compósito. Tanto o inchamento após 2 e 24 horas apresentaram uma correlação positiva com a quantidade de arabinose presente na madeira, enquanto que para o inchamento após 24 horas também foi encontrado correlação com a porcentagem de glucose. As espécies *Swartzia recurva* e *Inga alba*, que apresentaram os maiores valores médios de inchamento em espessura, possuem as maiores porcentagens de arabinose entre as espécies (3,15 e 2,04% respectivamente) e baixas porcentagens de glucose (61,12 e 49,51 respectivamente) quando comparadas com as demais espécies.

A figura 4.11 representa as médias da massa específica básica das madeiras tropicais comparadas com a média dos compósitos madeira-cimento delas

derivados. Letras diferentes acima de colunas da mesma cor representam a diferença estatística encontrada no teste de média de Tukey a um nível de confiança de 95%.

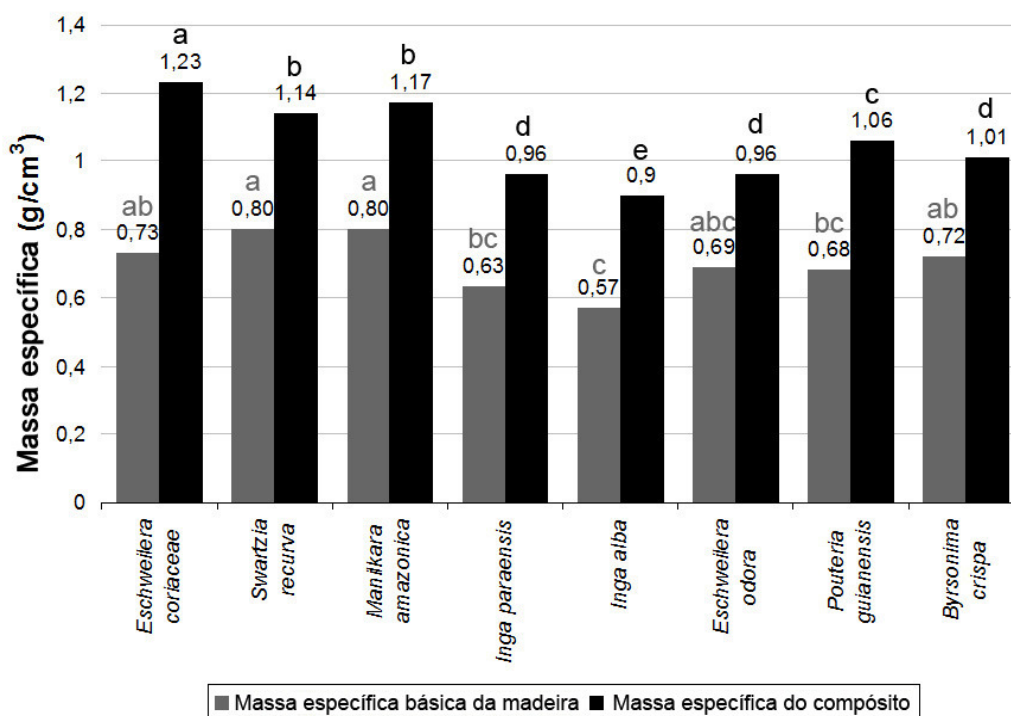


FIGURA 4.11. MASSA ESPECÍFICA BÁSICA DAS MADEIRAS TROPICAIS E MASSA ESPECÍFICA APARENTE DOS COMPOSTOS MADEIRA-CIMENTO
FONTE: O autor (2015)

Como indicado na tabela 4.5, a massa específica aparente dos compósitos apresentou uma correlação direta com a massa específica básica da madeira utilizada. No caso dos três tratamentos produzidos com espécies de madeira de maior massa específica básica (*Eschweilera coriacea*, *Swartzia recurva* e *Manilkara amazonica*), a massa específica final do compósito foi maior do que a massa específica nominal de 1 g/cm³. A massa específica do compósito também está relacionada com a área superficial das partículas. Estas duas correlações indicam que para os compósitos madeira-cimento produzidos pelo método de vibro-compactação, o volume de madeira utilizado na mistura passa a ser um limitante para a massa específica do produto. Madeiras mais leves e com partículas com maior área superficial formam um volume de mistura superior à capacidade das formas, que resulta em compósitos de menor massa específica.

Uma vez que a massa específica do compósito influencia as demais propriedades físicas, os compósitos foram divididos em três diferentes classes para a avaliação de médias pelo teste Tukey. A primeira classe é composta por compósitos com massa específica acima de $1,1 \text{ g/cm}^3$ (*Eschweilera coriacea*, *Swartzia recurva* e *Manilkara amazonica*), a segunda classe é de compósitos com massa específica entre 1 e $1,1 \text{ g/cm}^3$ (*Pouteria guianensis* e *Byrsonima crispera*) e a terceira classe de compósitos com massa específica abaixo de 1 g/cm^3 (*Inga paraensis*, *Inga alba* e *Eschweilera odora*).

Na figura 4.12, os valores médios de absorção de água após 2 e 24 horas de imersão foram apresentados acompanhados do teste de Tukey. Letras iguais dentro de colunas da mesma cor representam que não houve diferença estatística entre os valores por classe de massa específica.

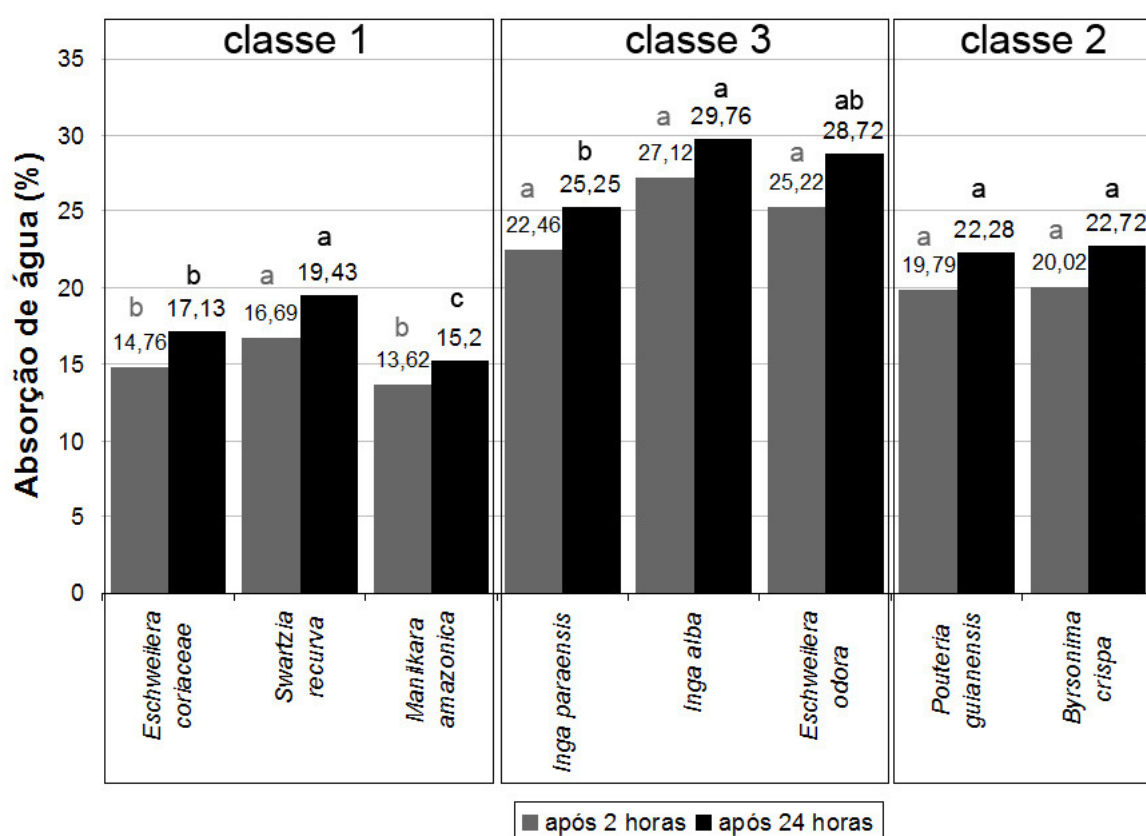


FIGURA 4.12. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 2 E 24 HORAS DE IMERSÃO POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA

FONTE: O autor (2015)

O comportamento da absorção de água após 24 horas manteve o padrão semelhante ao da absorção após 2 horas para todas as classes. Para compósitos com maior massa específica, classe 1, a menor absorção em corpos de prova de *Manilkara amazonica*. Como pode ser observado na figura 4.10, compósitos produzidos com partículas de *Manilkara amazonica* apresentam superfície visualmente mais fechadas do que os produzidos com *Swartzia recurva*, mesmo que ambas espécies apresentaram mesma massa específica básica ($0,8 \text{ g/cm}^3$) e resultaram em compósitos com a mesma massa específica. O melhor fechamento superficial com o adesivo mineral impede a absorção de água. Além da influencia da massa específica dos compósitos, os resultados médios encontrados para a classe 1 foram inferiores aos das demais classes também porque o menor volume de partículas exigido para espécies com maior massa específica acarreta em compósitos com menor quantidades de espaços vazios devido a melhor acomodação das partículas durante o processo de vibração.

Não houve diferença significativa entre os compósitos da classe 2. Para a classe 3, resultados médios para absorção de água após 2 horas de imersão foi estatisticamente igual para os três tipos de compósitos de baixa massa específica. Após 24 horas de imersão, os compósitos produzidos com *Inga paraensis* absorveram menos água do que os compósitos de *Inga alba*.

A figura 4.13 apresenta os valores médios para inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água. Colunas de mesma cor acompanhadas de letras iguais indica que não houve diferença estatística entre médias indicada pelo teste de Tukey dentro de uma mesma classe de massa específica.

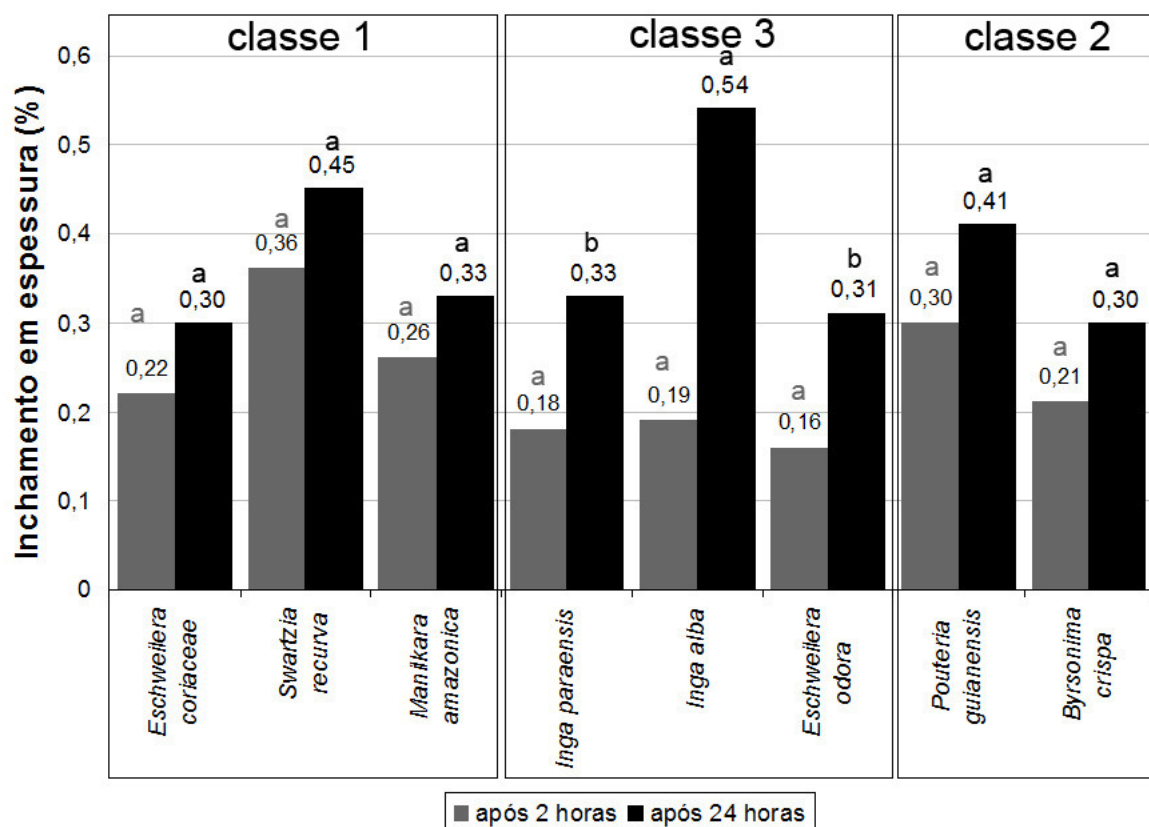


FIGURA 4.13. VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 2 E 24 HORAS DE IMERSÃO EM ÁGUA POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA
 FONTE: O autor (2015)

A propriedade de inchamento em espessura não foi afetada estatisticamente pela massa específica dos painéis dentre os compósitos da classe 1 e 2. Para os compósitos de massa específica abaixo de 1 g/cm^3 , o valor médio de inchamento em espessura após 24 horas foi superior nos compósitos de *Inga alba*. Contudo, todos os tratamentos apresentaram valores entre a faixa considerada aceitável para painéis madeira-cimento comerciais que é abaixo de 1% após 2 horas de imersão e de 1,5% após 24 horas de imersão em água (NCL INDUSTRIES LTD., 2011).

4.3.3. Propriedades mecânicas dos compósitos

Os valores médios das propriedades mecânicas dos compósitos produzidos com as oito espécies tropicais são apresentados na tabela 4.7.

TABELA 4.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS.

Espécie	LI (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	RC (MPa)
<i>Eschweilera coriacea</i>	0,53 (24,03)	3,66 (25,11)	2873 (35,31)	13,47 (18,09)
<i>Swartzia recurva</i>	0,60 (22,78)	3,21 (18,86)	2631 (33,02)	10,07 (5,57)
<i>Manilkara amazonica</i>	0,34 (20,26)	3,41a (33,91)	2472 (44,08)	9,80 (15,23)
<i>Inga paraensis</i>	0,41 (13,78)	2,42 (18,51)	1300 (28,71)	7,50 (28,83)
<i>Inga alba</i>	0,58 (17,44)	2,91 (17,43)	1348 (24,90)	5,35 (18,42)
<i>Eschweilera odora</i>	0,48 (25,41)	2,39 (24,41)	1292 (36,06)	6,71 (28,22)
<i>Pouteria guianensis</i>	0,46 (21,39)	2,68 (22,01)	1669 (33,29)	7,63 (20,82)
<i>Byrsonima crissa</i>	0,40 (23,10)	2,21 (27,52)	1403 (37,67)	5,98 (18,93)

SENDO: LI, ligação interna; MOR, módulo de ruptura; MOE, módulo de elasticidade; RC, resistência à compressão. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

O requisito mínimo para a propriedade de ligação interna sugerido para painéis de madeira-cimento comerciais produzidos pelo processo *BISON* é de 0,4 MPa (NCL INDUSTRIES LTD., 2011). O processo de produção por vibro-compactação mostrou-se viável para este requisito, uma vez que sete das oito espécies testadas produziram compósitos com valores médios superiores a exigência do mercado. Apenas os compósitos produzidos com partículas de *Manilkara amazonica* apresentou um valor médio inferior a 0,4 MPa. Contudo, nenhum dos tratamentos apresentaram valores suficientemente altos para atender ao requisito mínimo *BISON* de 9 MPa para MOR e 3.000 MPa para MOE de painéis madeira-cimento comerciais (NCL INDUSTRIES LTD., 2011).

A norma NBR 8953 (ABNT, 1992) classifica os grupos de resistência dos concretos para fins estruturais de acordo com a resistência à compressão do material. O requisito mínimo indicado pela norma é o da classe C10 do grupo I para concretos com valores de resistência à compressão entre 10 e 15 MPa. Os corpos

de prova produzidos com partículas de *Eschweilera coriaceae* e de *Swartzia recurva* atingiram esse requisito mínimo apresentando um valor médio de 13,47 MPa e 10,07 MPa, respectivamente.

Na tabela 4.8 são apresentadas as correlações observadas entre as propriedades mecânicas dos compósitos e as características das partículas, índices de inibição da madeira utilizada e a massa específica dos compósitos

TABELA 4.8. CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS E A MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS E DA MADEIRA, ÁREA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS E ÍNDICES DE INIBIÇÃO.

Variáveis	LI	MOR	MOE	RC
ME do	-0,0343	0,7920	0,9505	0,9245
Compósito	(0,9357)	(0,0191)*	(0,0003)*	(0,0010)*
ME da madeira	-0,1930	0,4599	0,7427	0,6139
	(0,6470)	(0,2515)	(0,0348)*	(0,1054)
Área Superficial	0,2790	-0,4941	-0,7377	-0,7295
	(0,5034)	(0,2133)	(0,0367)*	(0,0400)*
Índice de Inibição	0,2865	-0,2992	-0,1910	-0,1909
	(0,4916)	(0,4716)	(0,6505)	(0,6506)
Fator C _A	-0,3747	0,3235	0,2585	0,2531
	(0,3604)	(0,4344)	(0,5365)	(0,5453)
T _R	0,3616	-0,2533	-0,0914	-0,1339
	(0,3788)	(0,5449)	(0,8295)	(0,8308)

SENDO: Valores entre parênteses relativos ao valor-P; * Significativo ao nível de 5% de significância
 FONTE: O autor (2015)

Não houve uma correlação significativa entre a propriedade de ligação interna e as massa específicas do compósito ou da madeira utilizada, da área superficial das partículas ou dos três índices de inibição da cura inicial do cimento. O fato de não haver correlação entre a ligação interna e a massa específica final do corpo de prova indica que a propriedade provavelmente foi mais afetada pela posicionamento entre as partículas de madeira do que pela sua interação com o cimento.

As demais propriedades mecânicas (MOR, MOE e resistência à compressão) apresentaram uma correlação positiva com a massa específica do compósito. Ou seja, compósitos mais densos apresentaram valores médios mais altos para estas

propriedades. A correlação especificamente para o MOE também pode ser considerada em relação à massa específica básica da madeira utilizada no processo e, por consequência, para com a área superficial das partículas. A resistência à compressão também apresentou uma correlação negativa significativa para a área superficial das partículas. Partículas com menor área são cobertas mais facilmente pelo cimento e apresentam valores médios mais altos de resistência à compressão.

Assim como as propriedades físicas, também não houve correlação significativa entre os índices de inibição à cura inicial do cimento e as propriedades mecânicas após 28 dias de cura.

A tabela 4.9 apresenta a correlação entre as propriedades mecânicas e as porcentagens de monossacarídeos presentes nas madeiras utilizadas na produção dos compósitos.

TABELA 4.9. CORRELAÇÃO LINEAR DE PEARSON ENTRE QUANTIDADE DE MONOSSACARÍDEOS NAS MADEIRAS E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

	mannose	glucose	arabinose	xilose	fucose	galactose	ramnose
LI	-0,3201	-0,7684	0,7581	0,7730	-0,0276	-0,5223	-0,3748
	(0,4396)	(0,0259)*	(0,0293)*	(0,0245)*	(0,9482)	(0,1842)	(0,3602)
MOR	0,0736	-0,2096	0,3964	0,1443	-0,3511	-0,2933	-0,2878
	(0,8626)	(0,6184)	(0,3310)	(0,7332)	(0,3938)	(0,4808)	(0,4894)
MOE	0,0889	0,0146	0,4196	-0,0094	-0,3799	-0,3719	-0,2407
	(0,8342)	(0,9727)	(0,3007)	(0,9824)	(0,3533)	(0,3643)	(0,5658)
RC	0,1937	0,1580	0,2025	-0,2177	-0,1362	-0,0473	-0,1287
	(0,6458)	(0,7087)	(0,6305)	(0,6045)	(0,7477)	(0,9114)	(0,7614)

SENDO: Valores entre parênteses relativos ao valor-P; * Significativo ao nível de 5% de significância
 FONTE: O autor (2015)

A tabela 4.9 indica que as quantidades e tipos de açúcares presentes nas madeiras utilizadas na produção dos compósitos influencia apenas a propriedade da ligação interna. Os compósitos produzidos com a espécie *Manilkara amazonica* apresentaram os menores valores médios de ligação interna, sendo que a espécie apresentou alto teor de glucose (70,74%) e baixos teores de arabinose (1,32%) e xilose (12,60%). Já os compósitos com maiores valores da propriedade foram produzidos com partículas das espécies *Swartzia recurva* e *Inga alba*, ambas espécies apresentaram baixo teor de glucose (61,12 e 49,51% respectivamente),

quando comparados com as demais espécies, e altos teores de arabinose (3,15 e 2,04% respectivamente) e de xilose (32,29 e 40,41% respectivamente).

A figura 4.14 apresenta os valores médios encontrados para as propriedades de ligação interna acompanhados pelas letras que indicam a diferença estatística obtidas pelo teste de médias de Tukey. Letras semelhantes indicam que as médias não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância.

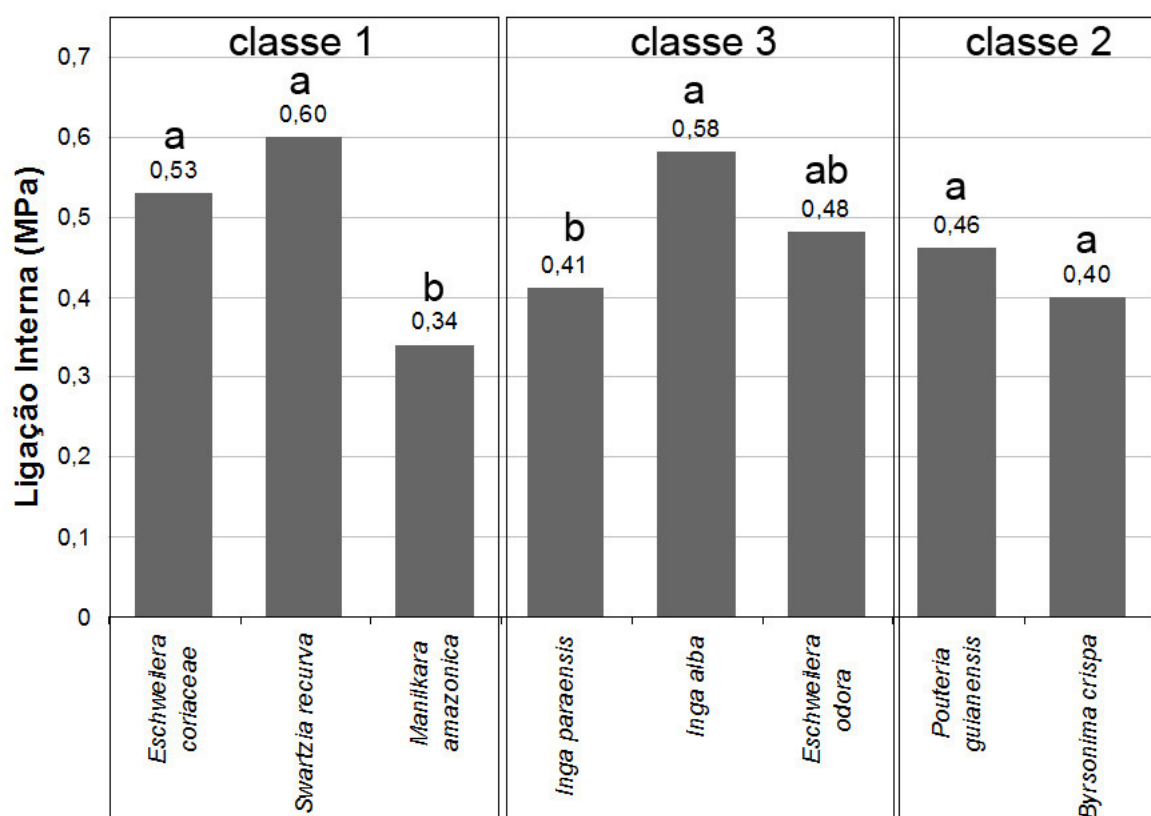


FIGURA 4.14. VALORES MÉDIOS DE LIGAÇÃO INTERNA POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA
FONTE: O autor (2015)

Dentro da classe de compósitos com a massa específica acima de $1,1 \text{ g/cm}^3$, os produzidos com partículas de *Eschweilera coriacea* e *Swartzia recurva* apresentaram valores médios de ligação interna superiores a 0,5 MPa o que os tornou estatisticamente diferentes do valor médio apresentado pelo compósito produzido com *Manilkara amazonica* (0,34 MPa). Já para os compósitos da classe 3, de baixa massa específica, os produzidos com *Inga alba* obtiveram valores médios de ligação interna estatisticamente superior aos de *Inga paraensis*. É importante frisar que as espécies *Manilkara amazonica* e *Inga paraensis* são as que

apresentaram maior porcentagem de glucose em sua composição em relação as demais espécies (70,74 e 74,69% respectivamente).

O uso de partículas de madeira tropical com 3% de CaCl_2 também apresentou melhores resultados de ligação interna do que os encontrados por Parchen (2012) na produção de compósitos madeira-cimento utilizando partículas de *Pinus* spp, com adição de plastificante e cal, e o mesmo método de adensamento por vibro-compactação. Parchen (2012) encontrou valores entre 0,09 e 0,13 MPa ao utilizar o cimento Portland tipo II - Z. A superioridade dos valores de ligação interna quando utilizadas espécies tropicais em relação ao uso de *Pinus* spp, espécie tida como de baixa inibição deve-se provavelmente a três fatores: (1) Diferente granulometria usada nos dois casos. Os corpos de prova de *Pinus* spp foram produzidos com partículas retidas entre peneiras com abertura entre 2,4 e 10,3 mm enquanto que no caso dos compósitos de madeira tropical as partículas utilizadas foram as retidas entre 1,40 e 2,36mm. A menor dimensão das partículas permite um melhor acomodamento durante o processo de vibração. O entrelaçamento físico das partículas favorecem a propriedade de ligação interna graças ao fenômeno de ancoragem. (2) A diferente relação madeira-cimento. A ligação interna está diretamente correlacionada com a quantidade de aglutinante utilizado nos compósitos. Parchen (2012) usou uma relação 1:1, enquanto que nesta pesquisa a relação utilizada foi de 2,75:1. (3) O uso de CaCl_2 como acelerador tem um comportamento diferente do que o uso de cal.

A figura 4.15 apresenta os gráficos com os valores médios para as propriedades mecânicas de módulo de ruptura (MOR). Colunas com valores médios acompanhados de letras iguais indicam semelhança estatística para os resultados segundo o teste de Tukey.

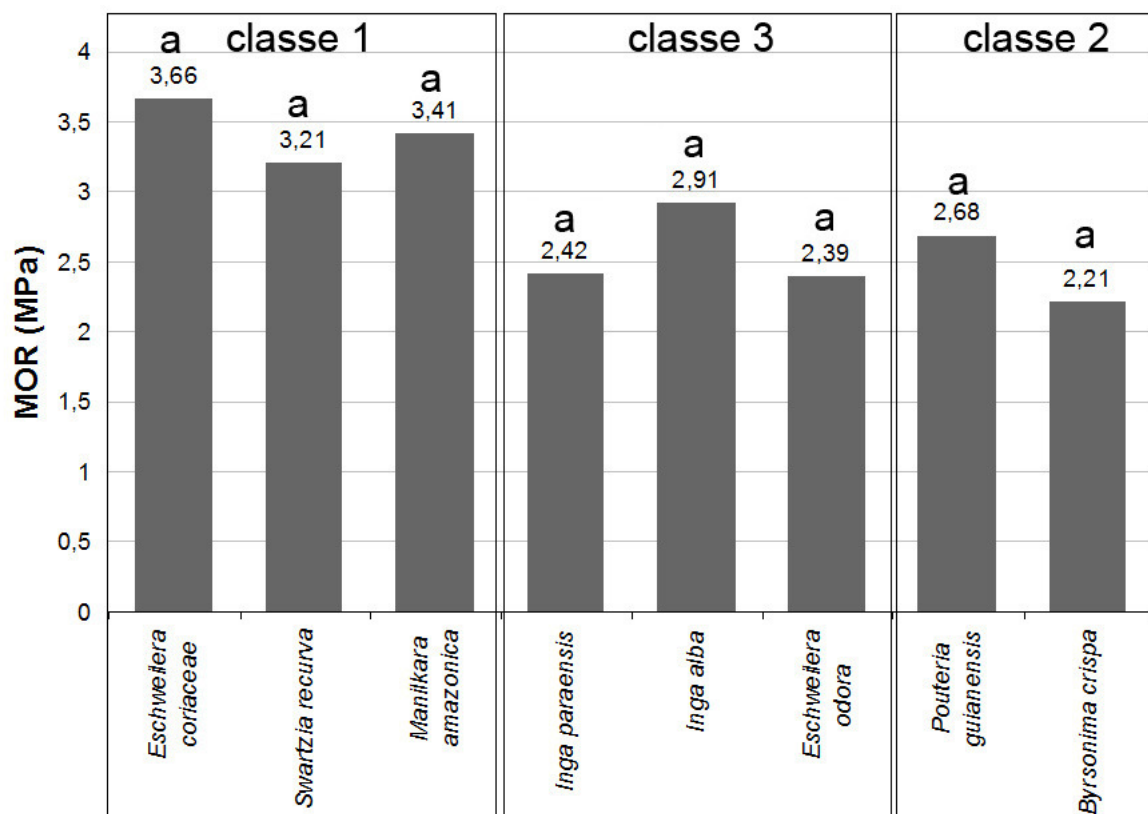


FIGURA 4.15. VALORES MÉDIOS PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MOR POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA
 FONTE: O autor (2015)

Dentro das classes de massa específica semelhante, não houve diferença estatística dos valores médios encontrados para MOR. Porém, mesmo o valor médio mais alto (3,66 MPa) é consideravelmente inferior ao requisito mínimo de 9 MPa exigido para painéis madeira-cimento comerciais produzidos pelo método *BISON* (NCL INDUSTRIES LTD., 2011). A baixa resistência dos compósitos produzidos pelo método de adensamento por vibro-compactação quando comparada com painéis produzidos pelo método tradicional de prensagem com mesma massa específica pode ser atribuída à falta de orientação das partículas vibradas.

A figura 4.16 apresenta os gráficos com os valores médios para as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade (MOE). Valores médios acompanhados de letras iguais indicam semelhança estatística para os resultados segundo o teste de Tukey.

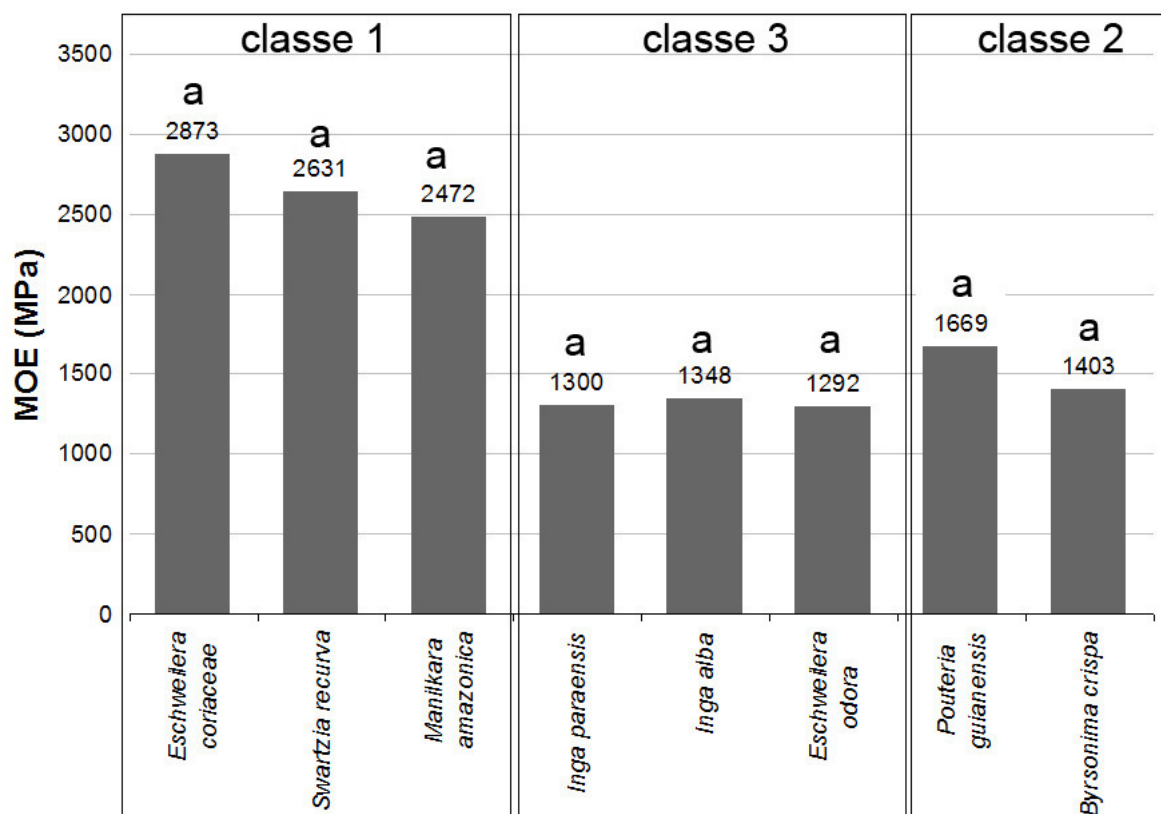


FIGURA 4.16. VALORES MÉDIOS PARA AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MOE POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA
 FONTE: O autor (2015)

Dentro das classes de massa específica dos compósitos, não houve diferença estatística para os valores médios de MOE. No geral, os maiores valores médios de MOE foram encontrados para os compósitos da classe 1 (*Eschweilera coriacea*, *Swartzia recurva* e *Manilkara amazonica*) que apresentaram valores muito próximos aos exigidos para painéis madeira-cimento produzidos pelo método *BISON* de 3.000 MPa (NCL INDUSTRIES LTD, 2011).

A figura 4.17 indica os valores médios encontrados para a propriedade de resistência à compressão. Letras diferentes entre as colunas significa que houve diferença estatística entre os resultados de acordo com o teste de Tukey.

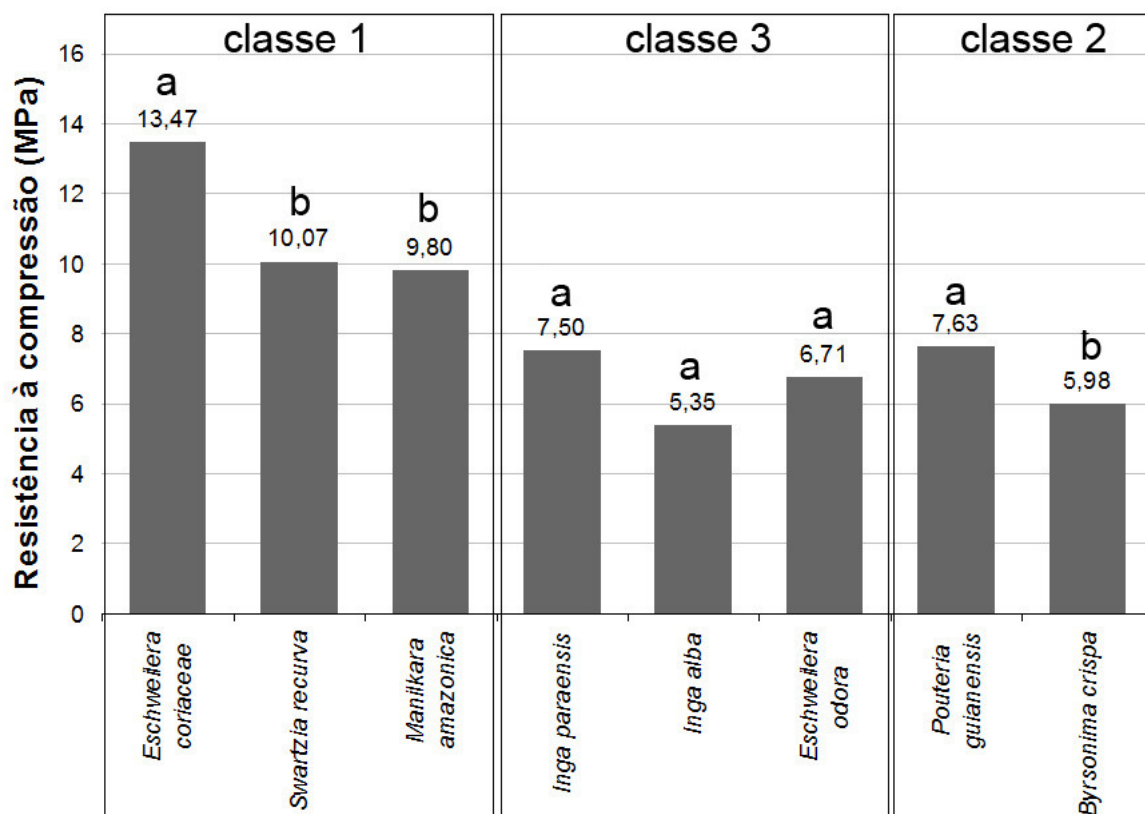


FIGURA 4.17. VALORES MÉDIOS PARA A PROPRIEDADE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO POR CLASSE DE MASSA ESPECÍFICA
FONTE: O autor (2015)

Os compósitos produzidos com partículas de *Eschweilera coriacea* apresentaram um valor médio de resistência à compressão (13,47 MPa) estatisticamente superior aos demais da classe 1, com compósitos de maior massa específica. Dentre os compósitos com massa específica entre 1 e 1,1g/cm³, classe 2, os produzidos com partículas de *Pouteria guianensis* apresentaram valores estatisticamente superiores aos de *Byrsonima crista*. Já dentro da classe 3, não houve diferença estatística entre os três compósitos de menor massa específica.

4.3.4. Análise de cluster

A figura 4.18 apresenta o dendrograma da análise de cluster pelo método da ligação completa (*furthest neighbor method*) que representa agrupamentos dos tratamentos baseado nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos e nas características das partículas (massa específica básica da madeira, índices de inibição e área superficial).

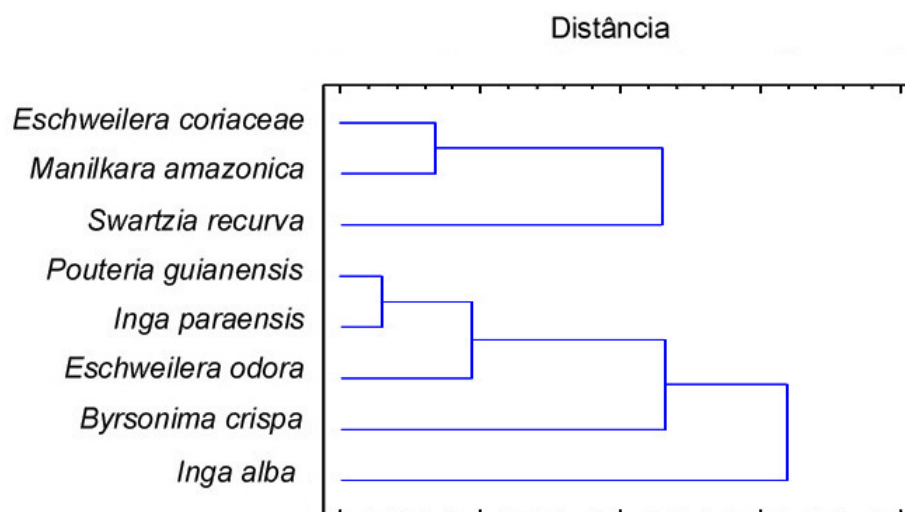


FIGURA 4.18. DENDROGRAMA DA ANÁLISE DE CLUSTER PELO MÉTODO DA LIGAÇÃO COMPLETA

FONTE: O autor (2015)

De acordo com análise de cluster, os compósitos madeira-cimento produzidos com as oito diferentes espécies tropicais podem ser classificados em dois grupos. O primeiro grupo, composto pelos tratamentos que utilizou partículas das espécies *Eschweilera coriacea*, *Manilkara amazonica* e *Swartzia recurva*, as mesmas espécies que produziram compósitos da classe 1 (com massa específica acima de $1,1\text{g/cm}^3$) e o segundo grupo com as cinco espécies estudadas. O grupo que englobou as três espécies, visualmente, apresentou os corpos de prova com uma superfície mais lisa e com menos falhas. Os painéis deste grupo também apresentaram melhores resultados nos testes de flexão e valores médios mais baixos de absorção de água.

Contudo a indicação para uso deve ser relacionada ao uso final do produto, por isso a recomendação do uso de compósitos da classe 1 deve ser feita apenas em casos em que uma melhor resistência mecânica será exigida. Caso o produto final seja, por exemplo, material para preenchimento, em que a baixa massa específica seja mais importante do que as propriedades mecânicas, o uso das demais espécies pode ser recomendado.

4.4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- Espécies de alta massa específica geram compósitos de maior massa específica produzidos pelo método de vibro-compactação.
- O volume das partículas usado na mistura madeira-cimento-água é um importante fator limitante da massa específica final do produto neste método.
- Recomenda-se o uso de compósitos produzidos com partículas de *Eschweilera coriaceae*, *Manilkara amazonica* e *Swartzia recurva* para produtos finais que exigem resistência mecânica.
- Caso um dos requisitos para o uso final do compósito seja a baixa massa específica, recomenda-se o uso de madeira de *Inga alba*.
- As propriedades de inchamento em espessura e ligação interna dos compósitos são influenciadas pela composição química dos açúcares presentes na madeira utilizada como matéria prima.
- Não houve correlação entre as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos após 28 dias de cura e os três tradicionais índices de inibição da madeira à pega do cimento estudados no capítulo 3.

4.5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. 1996

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8953**. Concretos para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência. 1992

CANADIAN FOREST SERVICE **Report on cement bonded particleboard, its applications and preliminary assessment of a plant to be located in Alberta**. 1987. 42p

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS (COPANT). **COPANT 461**. Determinación del peso específico aparente. 1972.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 310**. Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 317**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira – Determinação do inchaço na espessura depois da imersão em água. 1993

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 319**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira – determinação da força da tensão perpendicular sobre a superfície plana da placa. 1993

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 326-1**. Wood-based panels – Sampling, cutting and inspection - Part 1: Sampling and cutting of test pieces and expression of test results. 1994.

MOSLEMI, A. A. Particle geometry *in*: MOSLEMI, A. A. **Particleboard. Vol.1: Material**. Souther Illinois University. p. 49 - 67. 1974

NCL INDUSTRIES LTD. **Bison panel - Cement bonded particle board**. Abids, 2011. Catálogo

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. **Concrete technology**. 2ª edição. Harlow: Pearson. 2010. 442p

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa massa específica produzido com compactação vibro dinâmica**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. 172p.

PEREIRA, D. SANTOS, D., VEDOVETO, M., GUIMARÃES, J., VERÍSSIMO, A.
Fatos florestais da Amazônia. Belém: IMAZON. 2010. 124p.

SIMATUPANG, M. H. Mineral-Bonded Wood Composites. *in*: SCHNIEWIND, A.
Concise encyclopedia of wood & wood-based materials. Pergamon, Oxford. p.
196 - 202. 1989.

VILELA, E., DU PASQUIER, B. Determinación del coeficiente de aptitud de un grupo
de maderas para su posible aplicación em la fabricación de tableros de papilla de
madera y cemento. **Revista Forestal Venezolana.** v.11. n. 16. p. 75-84. 1968

VITAL, B. R., HASELEIN, C. R., LUCIA, R. M. D. Efeito da geometria das partículas
nas propriedades das chapas de madeira aglomerada de *Eucalyptus grandis* (Hill ex-
Maiden). **Revista Árvore**, v. 16. n. 1. p. 88-96. 1992

WOLFE, R. W., GJINOLLI, A. Cement-bonded wood composites as an engineering
material. In: The use of recycled wood and paper in building applications, 1996,
Madison. **Proceedings...** Madison: Forest Products Society. 1997. p. 84-91.

5. USO DE ADITIVOS QUÍMICOS NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO DE *Eschweilera coriaceae* E *Eschweilera odora* PELO MÉTODO DE VIBRO-COMPACTAÇÃO.

5.1. INTRODUÇÃO

O gênero *Eschweilera* é considerado o mais comum da região amazônica em ordem de abundância (STEEGE *et al.*, 2006). Alvino *et al.* (2005) classificaram espécies de uma floresta secundária na Zona Bragantina, Pará, de acordo com seu potencial de uso. A espécie *Eschweilera coriaceae* foi considerada uma das de ocorrência mais frequentes (77 indivíduos/ha) da categoria de madeira de alto valor comercial.

A compatibilidade entre madeira de espécies deste gênero e o cimento Portland já foi estudado por Vilela e Du Pasquier (1968). Entre 27 espécies tropicais, os autores analisaram o grau de inibição da madeira comparando as temperaturas máximas da mistura madeira-cimento com a temperatura do cimento puro. A madeira de *Eschweilera* sp, conhecida no Brasil pelo nome popular de Mata-mata, foi considerada incompatível sendo que a mistura não atingiu uma temperatura máxima dentro das primeiras 24 horas. Já madeira de *Eschweilera monosperma* foi considerada regular, com um valor de inibição de 57% (temperatura máxima de 36°C e tempo para atingir esta temperatura de 15,5 horas). Porém a madeira não foi recomendada para o uso em painéis madeira-cimento devido a sua alta massa específica, 0,89 g/cm³.

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 4, madeiras de diferentes espécies de *Eschweilera* podem ser classificadas em diferentes grupos de viabilidade para produção de compósitos pelo método de vibro-compactação. O uso de partículas de *E. coriaceae* produziu compósitos de melhor características físicas e mecânicas do que compósitos produzidas com madeira de *E. odora*. Essa classificação ocorreu em compósitos que utilizaram o cloreto de cálcio (CaCl₂) como um aditivo para alterar a hidratação do C₃S.

O uso do CaCl₂ é o mais divulgado por sua ampla disponibilidade no mercado, o baixo custo e resultados comprovados por décadas de uso e estudo. O cloreto de cálcio é tido como único porque o Ca²⁺ é considerado o cátion mais eficiente na aceleração da cura do cimento, e há evidências que indicam que, para o

cimento tipo Portland, o ânion Cl^- tende a ser mais eficiente do que SO_4^{2-} e OH^- . O CaCl_2 não só altera a taxa de hidratação dos minerais do cimento, mas também reage com eles, influenciando as propriedades de resistência, composição química, área superficial, morfologia e porosidade dos produtos da hidratação (RAMACHANDRAN, 1995).

Wei *et al.* (2000) analisaram o efeito de 30 diferentes aditivos químicos na cura do cimento Portland quando misturados com partículas da madeira de *Betula albosinensis*. Quando se adicionou madeira ao cimento, notou-se uma redução da temperatura máxima de 60,3° para 40,8°C na reação exotérmica da hidratação do C_3S no estágio inicial da cura do cimento. O tempo para atingir essa temperatura máxima também foi alterado, sendo que o cimento puro atingiu seu pico de temperatura em 9 horas, enquanto que, ao se misturar madeira, esse tempo passou a ser de 10,2 horas. Dos 30 aditivos testados, o aditivo que se mostrou mais eficiente foi o CaCl_2 . Ao se adicionar 4% de cloreto de cálcio, baseado no peso seco do cimento, a reação atingiu a temperatura máxima de 54,3°C em 8,7 horas.

Contudo apenas o efeito acelerador do aditivo pode não ser suficiente para sobrepor o efeito inibidor que extrativos da madeira podem causar na cura do cimento. Semple e Evans (2002) estudaram o efeito de diversos aditivos no combate do efeito inibidor dos taninos polifenólicos presente no cerne da madeira de *Acacia mangium*. O uso do cloreto de cálcio foi considerado um bom aditivo, mas não tão eficiente quanto os cloretos de Sn^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Ni^{2+} e Sr^{2+} .

Independente do tipo de cloreto, seu uso passou a ser questionado, na segunda metade do século passado, por induzir a corrosão do aço revestido de concreto estrutural. Assim, muitos pesquisadores passaram a indicar o valor de cloreto crítico que pode ser usado no concreto baseado no peso do cimento. Em países da Europa, assim como na América do Norte, tornou-se prática limitar o uso do cloreto em apenas 0,4% do peso do cimento (ANGST *et al.*, 2009). Uma possível alternativa ao uso cloreto é o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Dal Ri (2002) estudou a adição de cal hidratada em 11 diferentes tipos de misturas para concreto. Para todas as misturas investigadas, a adição resultou em um aumento nos valores de resistência a compressão.

O objetivo deste capítulo foi analisar o efeito de diferentes aditivos químicos nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos madeira-cimento produzidos pelo método de adensamento por vibro-compactação utilizando partículas de duas

espécies de madeira, *Eschweilera coriaceae* e *Eschweilera odora*, que embora pertençam ao mesmo gênero possuem comportamentos opostos ao se tratar de inibição à cura do cimento.

5.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Com base nos resultados encontrados no capítulo 3, foram selecionadas as espécies *Eschweilera coriaceae* e *Eschweilera odora* que apresentaram, respectivamente, o menor e o maior índice de inibição dentro das oito espécies estudadas.

A madeira utilizada foi de espécimes procedente da Reserva Biológica do Cuieiras, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA. Após processamento, as costaneiras foram separadas e enviadas para o Laboratório de Painéis de Madeira, UFPR, onde foram descascadas, submersas em água fria por 7 dias, reprocessadas em um picador de disco, secas e transformadas em partículas em um moinho de martelo.

Foram utilizadas as partículas, que após peneiramento automático, passantes em uma peneira com abertura de 8 *mesh* e retidas em uma peneira de 14 *mesh*.

5.2.1. Aditivos químicos

Foram utilizados dois tipos de cloreto como aceleradores de cura do cimento, o cloreto de cálcio (CaCl_2) e cloreto de magnésio (MgCl_2), sendo adicionado uma quantidade igual a 3% do peso seco do cimento.

O hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), ou cal hidratada, foi preparada através da hidratação de óxido de cálcio (CaO), com grau de pureza de 80%, em proporções que resultou em uma solução com 21,3% de CaO . A solução foi adicionada na mistura seguindo a relação 1:1 com o peso seco da madeira.

A tabela 5.1 apresenta a relação entre espécie utilizada e tipo de aditivo químico usado para cada tratamento.

TABELA 5.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Tratamento	Espécie	Aditivo químico
T1	<i>Eschweilera coriaceae</i>	-
T2	<i>Eschweilera coriaceae</i>	CaCl ₂
T3	<i>Eschweilera coriaceae</i>	MgCl ₂
T4	<i>Eschweilera coriaceae</i>	Cal hidratada
T5	<i>Eschweilera odora</i>	-
T6	<i>Eschweilera odora</i>	CaCl ₂
T7	<i>Eschweilera odora</i>	MgCl ₂
T8	<i>Eschweilera odora</i>	Cal hidratada

FONTE: O autor (2015)

5.2.2. Confeção dos corpos de prova

A partículas foram inicialmente misturadas manualmente com cimento tipo Portland CP II - Z na relação 2,75:1, baseado no peso seco das partículas. Para cada mistura foi adicionado uma quantidade de água obtida através da adaptação da fórmula sugerida por Simatupang (1979), com o acréscimo de 15% a mais de água baseado no peso seco do cimento, uma vez que não há pressão no processo de compactação por vibração, que torna a água no interior das partículas inacessível para a reação:

$$H_2O = (C \times 0,5) + (M \times (0,3 - TU\%)) \text{ (g)}$$

ONDE: C o peso do cimento (g), M o peso das partículas (g) e TU% o teor de umidade das partículas.

Os corpos de prova de madeira-cimento foram produzidos pelo processo de adensamento por vibro-compactação sugerido por Parchen (2012). Os tratamentos foram depositados em moldes prismáticos de madeira compensada com 42 cm de comprimento, 7 cm de largura e 1,5 cm de espessura. A quantidade de material depositado em cada molde foi calculada considerando uma massa específica nominal de 1 g/cm³.

Os moldes preenchidos eram então submetidos à mesa vibratória com uma carga de impacto vertical equivalente a 220 N à 3.000 RPM por 30 segundos. Com a vibração, ocorreu a sedimentação do material. O molde então foi preenchido novamente com mais mistura e novamente submetido à vibração. Este processo foi

repetido até todo o material preparado ser aplicado no molde, ou até não haver mais espaço no molde, mesmo após à vibração.

A mistura foi mantida dentro do molde por 7 dias. Após esse período, o molde foi desmontado e os corpos de prova mantidos em ar livre no período restante para se completar os 28 dias de cura.

5.2.3. Ensaaios físicos e mecânicos

Após a cura, os corpos de prova foram cortados com serra diamantada para que as dimensões atendessem as normas européias para os testes de absorção de água e inchamento em espessura (EN 317, 1993), flexão estática (EN 310, 1993) e ligação interna (EN 319, 1993).

5.2.4. Análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com arranjo fatorial para os tratamentos visando avaliar a interação entre dois fatores, aditivo químico e espécie utilizada. Para verificar o efeito dos tratamentos sobre as propriedades dos compósitos madeira-cimento, foi realizada uma análise de covariância considerando a massa específica covariável e na verificação da existência de diferenças estatísticas entre médias, o teste de Tukey foi aplicado, ao nível de probabilidade de 95%. Todos os testes foram realizados com o auxílio do *software* Statistica 10.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 - Propriedades físicas dos compósitos

A figura 5.1 apresenta a aparência visual dos corpos de prova produzidos com as duas espécies de *Eschweilera* com adição de diferentes aceleradores de cura.

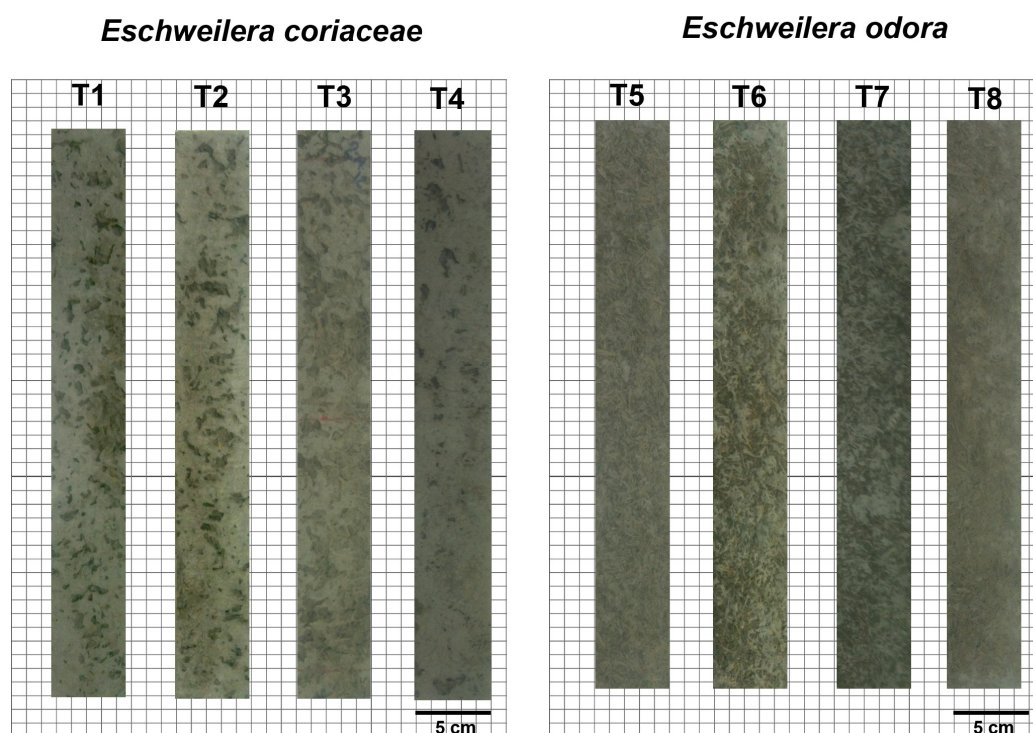


FIGURA 5.1. APARÊNCIA VISUAL DOS CORPOS DE PROVA
 FONTE: O autor (2015)

Visualmente os corpos de prova produzidos com partículas de *E. coriacea* apresentaram uma superfície menos porosa do que os produzidos com *E. odora*. Para os tratamentos de *E. coriacea*, não houve diferença aparente entre os corpos de prova produzidos com ou sem adição dos cloretos, seja do CaCl_2 ou o MgCl_2 . Já para os tratamentos de *E. odora*, a ausência de aceleradores gerou corpos de prova com aparência mais frágeis do que os com adição de cloretos.

Em relação aos tratamentos com uso de cal hidratada (T4 e T8), pode-se notar que as misturas apresentaram excesso de umidade antes do processo de compactação. O excesso de água na mistura aumentou o potencial de segregação durante o processo de vibração, o que acarretou na perda de material aderente. No caso dos corpos de prova T8, este fator foi ainda mais crítico devido ao maior volume de partículas. Com a perda de material, cerca de 50% dos corpos de prova se partiram durante o desenformar. Os corpos de prova que não quebraram, apresentaram uma superfície extremamente irregular e de aparência frágil.

A tabela 5.2 apresenta os resultados médios das propriedades físicas dos compósitos madeira-cimento das duas espécies de *Eschweilera* com diferentes aditivos químicos.

TABELA 5.2. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS.

Tratamento	Massa específica (g/cm ³)	AA 2h (%)	AA 24h (%)	IE 2h (%)	IE 24h (%)
T1	1,22 (4,40)	15,70 (5,94)	17,62 (5,62)	0,16 (23,67)	0,21 (16,01)
T2	1,25 (4,23)	14,76 (7,31)	17,13 (8,23)	0,22 (47,67)	0,30 (47,29)
T3	1,23 (4,40)	15,60 (7,29)	17,50 (8,31)	0,32 (46,64)	0,47 (50,26)
T4	1,03 (3,10)	22,30 (4,78)	24,79 (4,02)	0,10 (57,18)	0,14 (52,00)
T5	0,87 (7,75)	28,48 (14,99)	31,21 (11,59)	0,13 (44,85)	0,26 (44,55)
T6	0,98 (5,41)	25,22 (9,60)	28,72 (6,59)	0,16 (34,39)	0,31 (58,84)
T7	0,92 (5,23)	22,38 (9,73)	25,74 (11,41)	0,18 (50,48)	0,28 (39,01)
T8	0,81 (16,91)	39,39 (16,51)	42,31 (15,84)	0,41 ^{ab} (40,28)	0,57 ^a (33,01)

SENDON: AA, absorção de água após 2 ou 24 horas; e IE, o inchamento em espessura após 2 e 24 horas. Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

A massa específica dos compósitos produzidos com a madeira de *Eschweilera coriacea* com e sem adição de cloretos (T1 a T3) apresentaram valores médios superiores à massa específica nominal de 1 g/cm³. Os compósitos produzidos com a espécie *Eschweilera odora* (T5 a T8) apresentaram valores médios de massa específica mais próximos ao valor nominal. Segundo o capítulo 4, a influência da espécie utilizada e a massa específica dos compósitos produzidos

pelo método de adensamento por vibro-compactação está correlacionada com a massa específica básica da madeira e a área superficial das partículas. No caso das espécies de *Eschweilera* não houve diferença significativa entre suas massa específicas básicas, 0,73 g/cm³ da madeira de *E. coriaceae* e 0,69 g/cm³ para a madeira de *E. odora*. Contudo a área superficial das partículas foi diferente, sendo maior para as partículas de *E. odora* (105,20 cm²/g) quando comparado com partículas de *E. coriaceae* (84,24 cm²/g). Uma maior área superficial é diretamente correlacionada com o volume de partículas, que por sua vez é um fator limitante da massa específica final do compósito produzido pelo método vibratório.

A tabela 5.3 apresenta a análise de variância fatorial para as propriedades físicas dos tratamentos, sendo que para as propriedades de absorção de água e inchamento em espessura, a massa específica foi considerada como um fator co-variante.

TABELA 5.3. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	P
Massa específica (g/cm³)	Aditivo	0,25051	3	0,08350	18,26	0,000000*
	Espécie	0,94166	1	0,94166	205,89	0,000000*
	Interação					
	AxB	0,02946	3	0,00982	2,15	0,110284
	Erro	0,17380	38	0,00457		
AA 2h (%)	Aditivo	118,573	3	39,524	17,835	0,000000*
	Espécie	39,178	1	39,178	17,678	0,000159*
	Interação					
	AxB	39,281	3	13,094	5,908	0,002123*
	Erro	81,998	37	2,216		
AA 24h (%)	Aditivo	162,5474	3	54,1825	11,4594	0,000019*
	Espécie	14,1414	1	14,1414	2,9909	0,092072
	Interação					
	AxB	223,9050	3	74,6350	15,7850	0,000001*
	Erro	174,9441	37	4,7282		

continua

TABELA 5.3. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

						conclusão
Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	P
IE 2h (%)	Aditivo	0,022275	1	0,022275	3,07141	0,089258
	Espécie	0,067151	3	0,022384	3,08634	0,041025*
	Interação					
	AxB	0,171226	3	0,057075	7,86977	0,000452*
	Erro	0,232079	32	0,007252		
IE 24h (%)	Aditivo	0,148325	3	0,049442	2,341365	0,090045
	Espécie	0,030736	1	0,030736	1,455542	0,235733
	Interação					
	AxB	0,631954	3	0,210651	9,975606	0,000068*
	Erro	0,739083	35	0,021117		

SENDO: * – Significativo ao nível de 95% de probabilidade

FONTE: O autor (2015)

A massa específica final dos compósitos foi influenciada tanto pela espécie utilizada como pelo tipo de aditivo presente na mistura inicial. Contudo não houve interação significativa entre os fatores para esta característica. Para as demais propriedades físicas, houve a interação entre os fatores. Para a propriedade de absorção de água após 2 horas de imersão, houve a influência independente do tipo de aditivo (fator A) e de espécie (fator B). Após 24 horas de imersão, a absorção não é mais influenciada pela espécie de madeira exclusivamente, sendo que os resultados foram afetados pelo aditivo e sua interação com o tipo de madeira.

O inchamento em espessura apresentou um padrão diferente de influência do que a absorção de água. Após 2 horas de imersão, o inchamento foi dependente do tipo de espécie utilizada e sua interação com o aditivo. Por sua vez, após 24 horas, o inchamento foi influenciado significativamente apenas pela interação dos dois fatores.

O gráfico apresentado na figura 5.2 ilustra os valores médios encontrados para as massa específicas dos tratamentos e a letra correspondente para o teste de comparação de médias de Tukey. Letras semelhantes indicam que não houve diferença estatística entre médias a um grau de probabilidade de 95%.

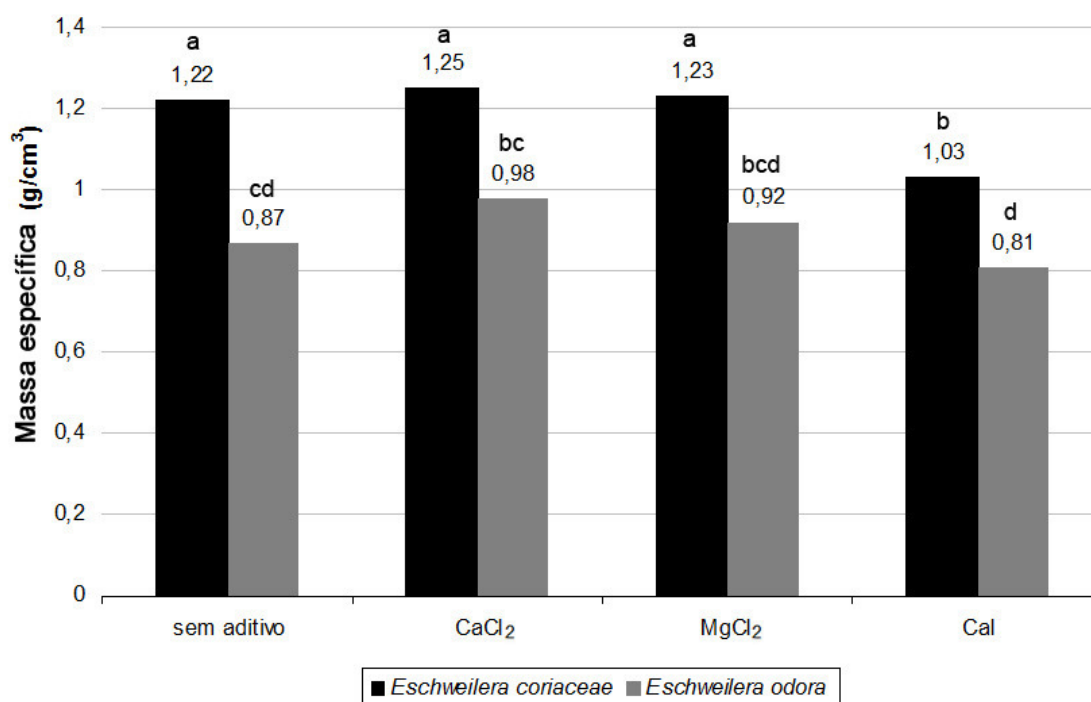


FIGURA 5.2. MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS
FONTE: O autor (2015)

Compósitos produzidos com partículas de *Eschweilera coriacea* apresentaram massa específica com diferença significativa quando comparadas com compósitos submetidos ao mesmo tratamento químico, mas com partículas de *Eschweilera odora*.

O uso ou não de cloreto, tanto de cálcio quanto de magnésio, não afetou a densificação dos compósitos produzido tanto com madeira de *Eschweilera coriacea* como com *Eschweilera odora*. Os compósitos produzidos com partículas de *E. coriacea* e tratados com cal hidratada apresentaram uma média inferior do que os demais tratamentos da mesma espécie. Este resultado foi condizente com a análise visual dos corpos de prova. O excesso de água utilizado no processo deixou a mistura úmida o que acarretou em um processo de lixiviação do material sólido durante o processo de vibração.

A figura 5.3 apresenta os gráficos com as médias dos valores de absorção de água dos compósitos após 2 e 24 horas de imersão em água, considerando a massa específica como uma covariável. Dentro de um mesmo gráfico, colunas acompanhadas de letras iguais representam igualdade estatística entre médias a um grau de probabilidade de 95%.

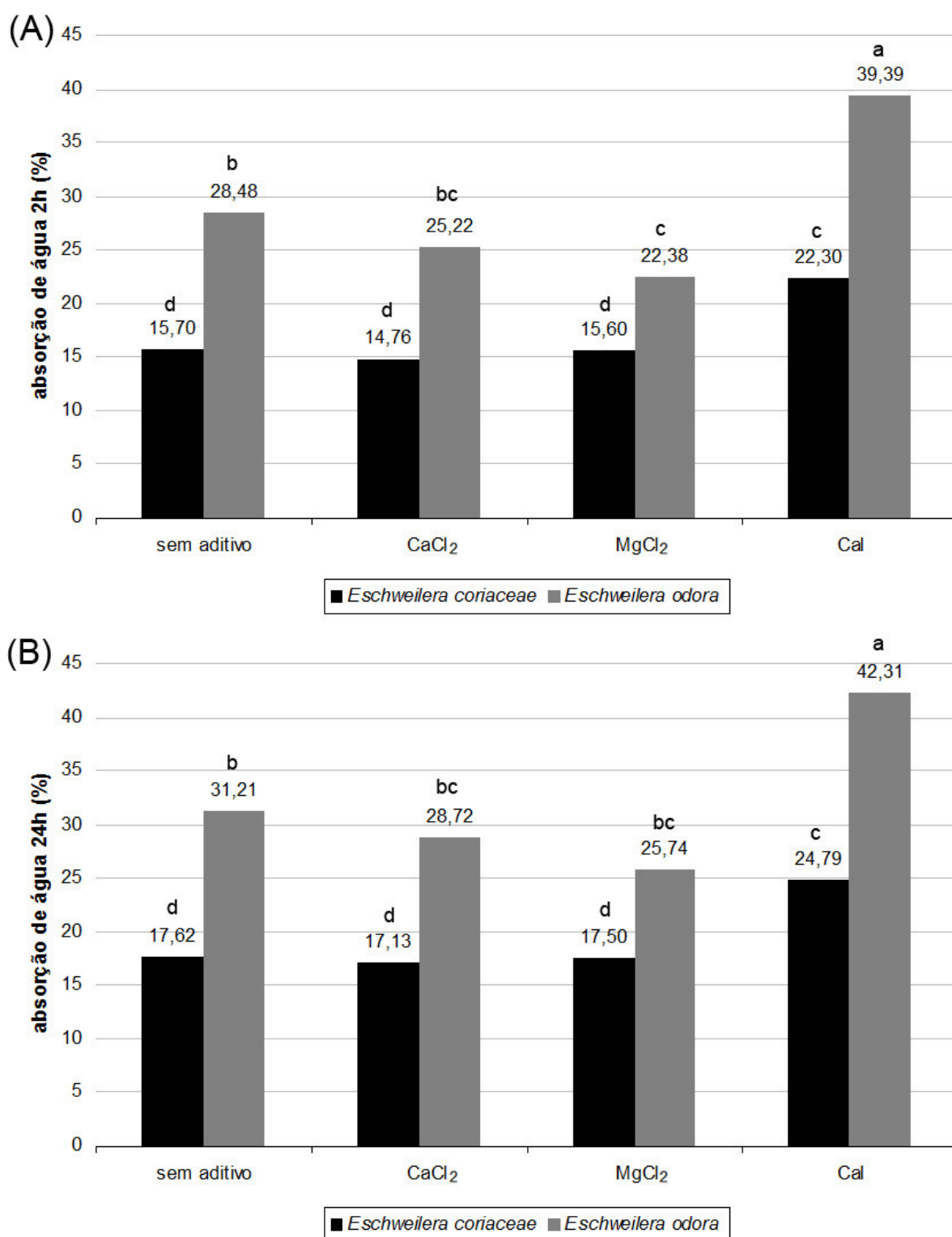


FIGURA 5.3. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 2 (A) E 24HORAS (B) DE IMERSÃO
 FONTE: O autor (2015)

Após 2 e 24 horas de imersão em água, os compósitos produzidos com *E. coriaceae* absorveram menor quantidade de água do que seus correlatos produzidos com *E. odora*. Uma vez que os valores foram ajustados pela massa específica dos compósitos e que não há diferença estatística entre as massa específicas básicas das duas espécies, a diferença entre a capacidade de absorção de água pode ser explicada pela área superficial das partículas utilizadas. As partículas de *E. odora* apresentaram maior área superficial e conseqüentemente maior área de contato com a água acarretando em uma maior absorção.

Em relação ao aditivo utilizado nas misturas, não houve efeito do uso de cloreto na propriedade de absorção de água após 2 e 24 horas para compósitos produzidos com *E. coriaceae*. Porém, quando cal hidratada foi adicionada à mistura, o valor médio de absorção aumentou.

Para os compósitos produzidos com partículas da espécie *E. odora*, o uso de $MgCl_2$ resultou em corpos de prova com menor capacidade de absorção de água após 2 horas de imersão do que os tratamentos sem aditivo (T5) ou com adição de $CaCl_2$ (T6). Porém, após 24 horas de imersão, esta diferença deixou de ser significativa. Assim como os tratamentos de *E. coriaceae* com cal hidratada, este tipo de aditivo também foi prejudicial à absorção de água dos compósitos de *E. odora*.

A figura 5.4 apresenta os gráficos relativos à propriedade de estabilidade dimensional dos compósitos indicada pelo inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão de água. Teste de médias de Tukey a um nível de probabilidade de 95% foi aplicado, sendo que colunas com a mesma letra indicam que não houve diferença estatística entre médias.

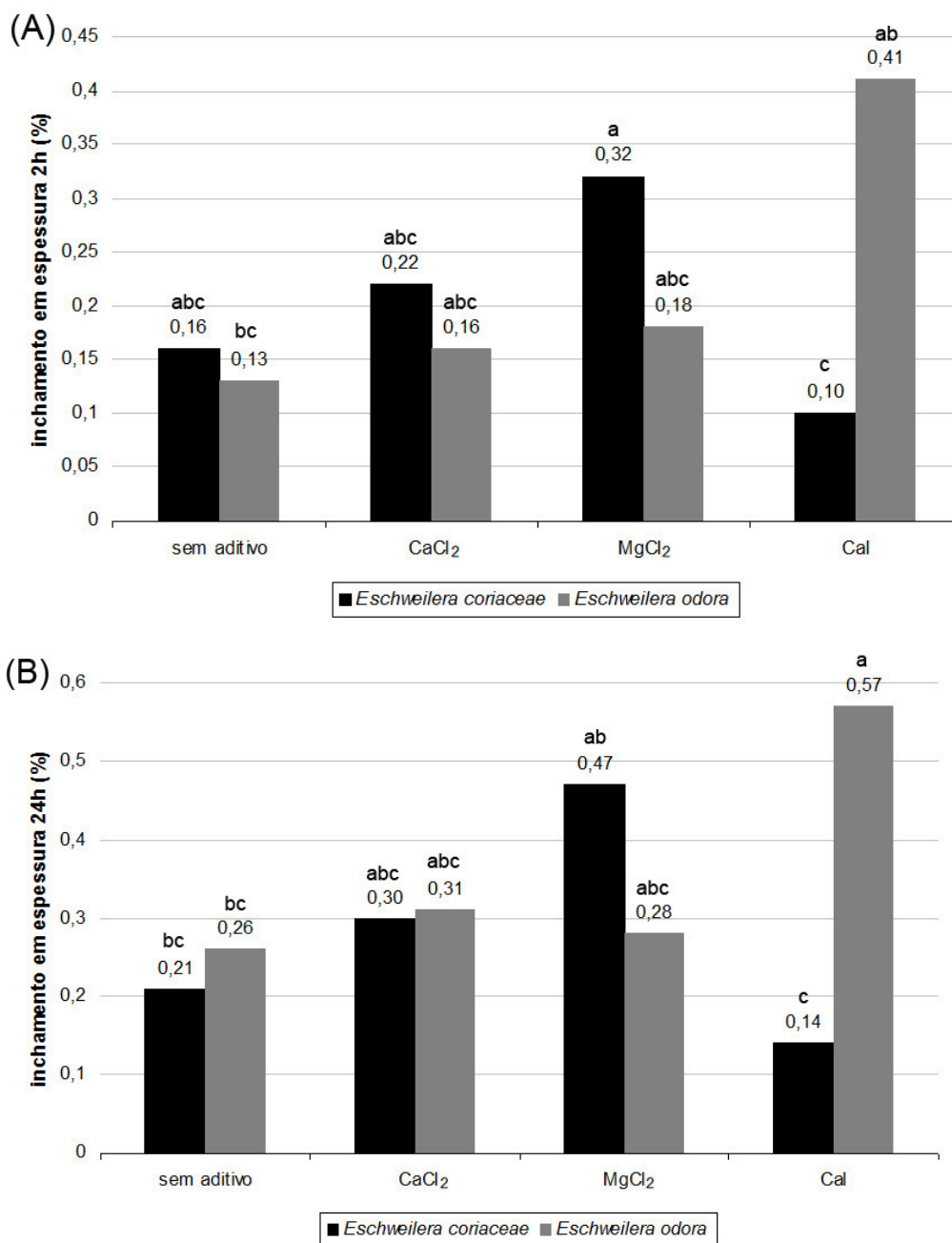


FIGURA 5.4. VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 2 (A) E 24HORAS (B) DE IMERSÃO EM ÁGUA

FONTE: O autor (2015)

Não houve diferença estatística significativa para o inchamento em espessura, após 2 ou 24 horas de imersão em água, entre os compósitos produzidos com partículas de *Eschweilera coriacea* e *Eschweilera odora* sem adição química ou com adição dos cloretos. Porém com a adição de cal hidratada, o inchamento em espessura dos compósitos de *E. coriacea* foram estatisticamente inferiores aos de *E. odora*.

Os compósitos produzidos com partículas de *E. coriaceae* com adição de cal hidratada (T4) apresentaram um comportamento não esperado, com valores médios inferiores aos do tratamento com $MgCl_2$ (T3). Uma possível explicação para este fenômeno foi a irregularidade e fragilidade da superfície dos corpos de prova produzidos com $Ca(OH)_2$. Durante o processo de imersão dos corpos de prova em água, houve degradação do material que resultou em um baixo valor na medição de espessura, que pode não ser um indicativo de melhor estabilidade dimensional como o número absoluto leva a crer.

5.3.2. Propriedades mecânicas dos compósitos

A tabela 5.4 apresenta os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas dos tratamentos estudados neste capítulo.

TABELA 5.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM DIFERENTES ADITIVOS QUÍMICOS.

Tratamento	LI (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
T1	0,61 (4,89)	2,30 (28,58)	2635 (31,34)
T2	0,53 (24,03)	3,66 (25,11)	2873 (35,31)
T3	0,30 (35,04)	2,61 (22,05)	1812 (43,37)
T4	0,33 (17,91)	2,41 (29,00)	1708 (43,50)
T5	0,38 (18,14)	1,13 (22,61)	524 (32,32)
T6	0,48 (25,41)	2,39 (24,41)	1292 (36,06)
T7	0,39 (29,25)	2,91 (9,06)	1314 (15,86)
T8	0,21 (28,20)	0,61 (63,97)	229 (17,52)

Sendo: LI, ligação interna; MOR, módulo de ruptura; MOE, módulo de elasticidade; Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

O requisito mínimo para a propriedade de ligação interna sugerido para painéis de madeira-cimento comerciais produzidos pelo processo *BISON* é de 0,4 MPa (NCL INDUSTRIES LTD., 2011). Os compósitos produzidos com partículas de *Eschweleira coriaceae* sem aditivo (T1) e com adição de cloreto de cálcio (T2) e compósitos produzidos com partículas de *Eschweleira odora* com adição de cloreto de cálcio (T6) apresentaram valores médios acima do requisito mínimo.

Porém, nenhum dos tratamentos apresentaram valores suficientemente altos para atender aos requisitos mínimos *BISON* de 9 MPa para MOR e 3.000 MPa para MOE para painéis madeira-cimento comerciais (NCL INDUSTRIES LTD., 2011). Compósitos produzidos com partículas de *Eschweleira odora* tratados com cal hidratada (T8) apresentaram resultados especialmente baixos para as propriedades de flexão estática. A fragilidade dos compósitos e baixos valores de carga máxima suportada por este tratamento foram refletidos no alto valor de coeficiente de variação para a propriedade de MOR.

Verifica-se na tabela 5.5 a análise de variância fatorial para as propriedades mecânicas dos compósitos madeira-cimento, considerando a massa específica como uma covariável.

TABELA 5.5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	P
LI (MPa)	Aditivo	0,264486	3	0,088162	12,61508	0,000007
	Espécie	0,019556	1	0,019556	2,79831	0,102368
	Interação AxB	0,053673	3	0,017891	2,56001	0,068838
	Erro	0,272556	39	0,006989		
MOR (MPa)	Aditivo	2,18417	3	0,728058	2,66911	0,057103
	Espécie	0,97773	1	0,97773	3,58443	0,063894
	Interação AxB	7,47318	3	2,491059	9,13241	0,000059*
	Erro	14,18411	52	0,272771		

continua

TABELA 5.5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	conclusão
						P
MOE (MPa)	Aditivo	1621805	3	540602	1,39336	0,25198
	Espécie	4127	1	4127	0,01064	0,918256
	Interação AxB	3955313	3	1318438	3,39818	0,024456*
	Erro	20175149	52	387984		

ONDE: * – Significativo ao nível de 95% de probabilidade; ns – Não significativo ao nível de 95% de probabilidade

FONTE: O autor (2015)

Observa-se que, para a propriedade de ligação interna, o efeito dos tratamentos foram significativos sendo basicamente influenciado pelo uso ou não de aditivo na mistura. Para as demais propriedades mecânicas, o efeito dos tratamentos também foi significativo, porém sendo influenciado pela interação dos fatores A (aditivo) e B (espécie).

A figura 5.5 apresenta os valores médios encontrados para a propriedade de ligação interna acompanhados pelas letras que indicam a diferença estatística obtidas pelo teste de médias de Tukey. Letras semelhantes indicam que as médias não diferem estatisticamente ao nível de 95% de probabilidade.

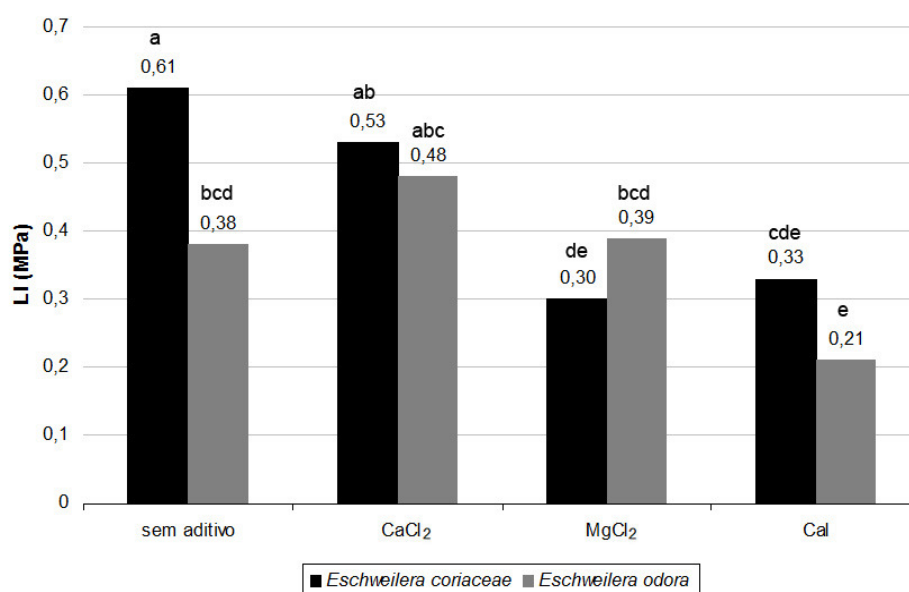


FIGURA 5.5. PROPRIEDADE DE LIGAÇÃO INTERNA

FONTE: O autor (2015)

Compósitos produzidos com partículas de *E. coriaceae* e *E. odora* não necessitaram de uso de aditivos para melhorar a propriedade relacionada à ligação interna. Tratamentos sem aditivos (T1 e T5) apresentaram valores estatisticamente iguais aos quando utilizado CaCl_2 (T2 e T6). Para os compósitos de *E. coriaceae*, não usar aditivos ainda mostrou-se estatisticamente mais vantajoso do que o uso de MgCl_2 ou cal hidratada.

A figura 5.6 apresenta o gráfico com os valores médios, acompanhado de seus respectivos resultados do teste de média de Tukey, para a propriedade mecânica de módulo de ruptura.

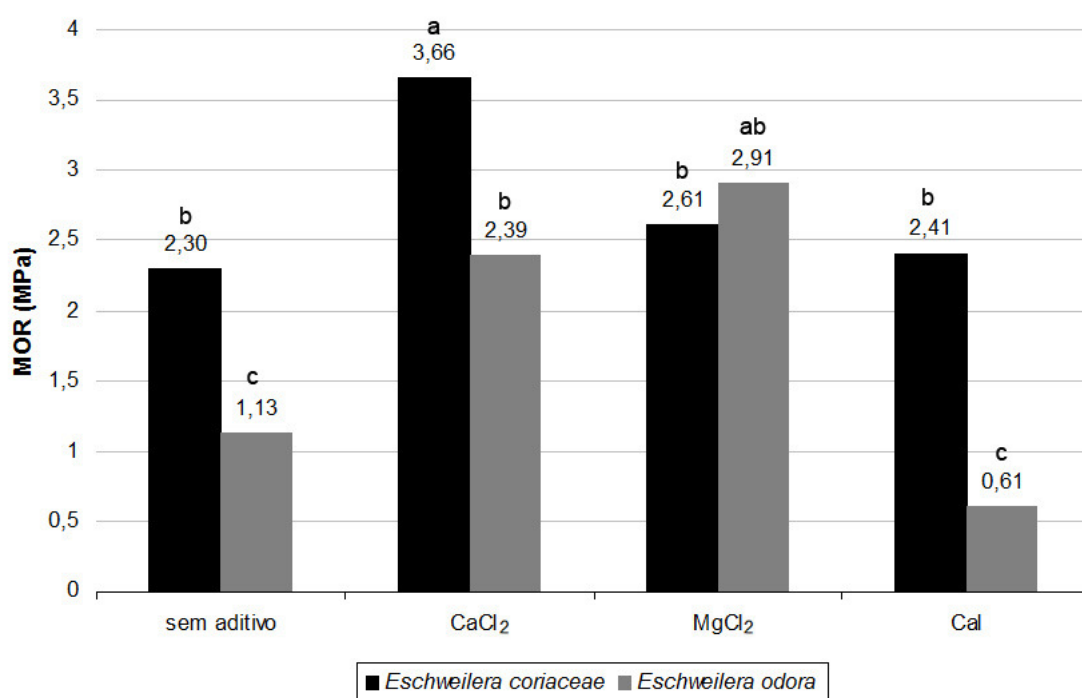


FIGURA 5.6. MÉDIA DE VALORES DO MÓDULO DE RUPTURA
FONTE: O autor (2015)

O uso de aditivos do tipo cloreto resultou em corpos de prova com melhores módulos de resistência para os tratamentos em que foram utilizadas partículas da espécie *E. odora*, que segundo o capítulo 3, apresentou maior inibição à cura inicial do cimento do que partículas de *E. coriaceae*. Quando a madeira de menor inibição foi utilizada, apenas o uso de CaCl_2 mostrou-se eficiente apresentando um valor médio superior aos demais aditivos. Este comportamento segue o observado por Semple e Evans (2002) para estes dois aditivos misturados a compósitos madeira-

cimento produzidos com madeira de Acácia (*Acacia mangium*). O cloreto de cálcio é naturalmente um aditivo mais eficiente à cura do cimento, porém o cloreto de magnésio é capaz de bloquear o efeito deletério dos polifenóis presentes em madeira com alto índice de inibição. Assim, o uso de $MgCl_2$ passou a ser recomendável apenas para a espécie de maior inibição, chegando a sobrepor o efeito e apresentar um valor médio de MOR igual ao do tratamento T2 (compósitos que utilizaram madeira de *E. coriaceae* misturados com $CaCl_2$). Já o uso da cal hidratada não apresentou diferença estatística quando comparado com os tratamentos sem aditivo.

Na figura 5.7, é apresentado o gráfico com os valores médios do módulo de elasticidade. Colunas acompanhadas com letras iguais representam semelhança estatística apontada pelo teste de Tukey.

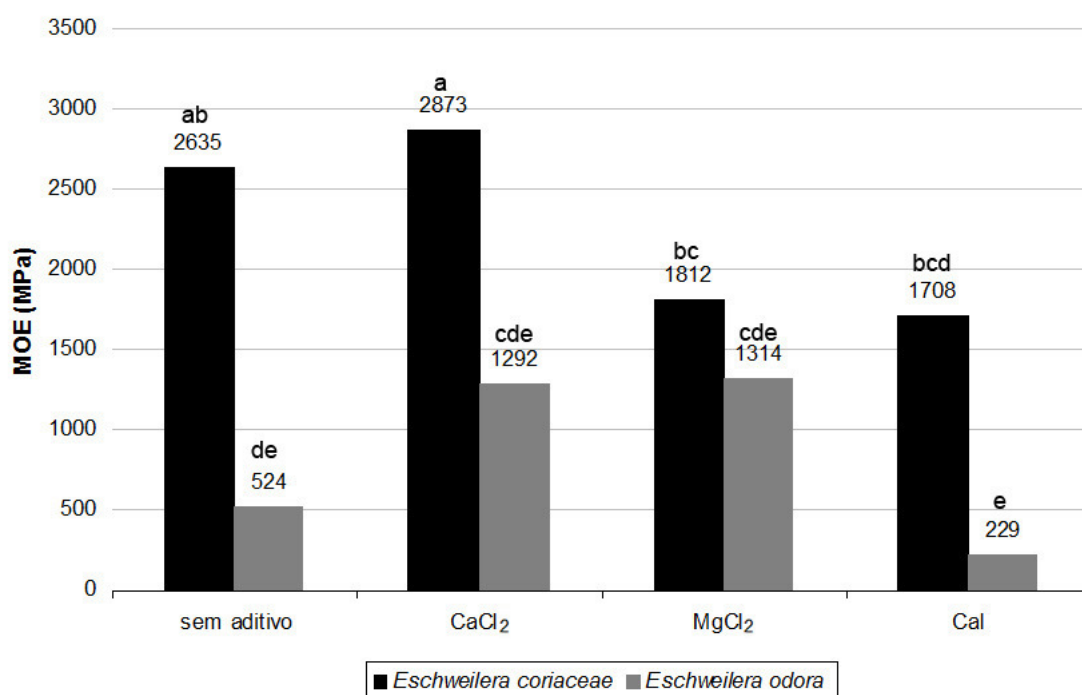


FIGURA 5.7. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE
FONTE: O autor (2015)

Para a propriedade de MOE, o uso de qualquer tipo de aditivo mostrou-se desnecessário, uma vez que não foi observada diferença estatística entre os tratamentos com aditivos e suas respectivas testemunhas (T1 e T4 para corpos de prova de *E. coriaceae* e *E. odora*, respectivamente).

O uso do aditivo $MgCl_2$ apresentou um comportamento diferenciado de acordo com a espécie utilizada na produção do compósito. Para os corpos de prova em que foram utilizadas partículas de baixa inibição à cura do cimento, *E. coriaceae*, o valor médio para MOE foi inferior aos corpos de prova com o uso de $CaCl_2$. Por sua vez, quando utilizado partículas de uma espécie de maior inibição, *E. odora*, o valor médio de MOE foi semelhante ao dos corpos de prova com $CaCl_2$, sendo que foi o único caso em que tratamentos entre espécies apresentou resultado estatisticamente iguais.

5.4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- A necessidade do uso e a escolha do tipo de aditivo deve ser correlacionada com a espécie de madeira utilizada na produção de compósitos madeira-cimento pelo método de adensamento por vibro-compactação.
- O uso de aditivos químicos a base de cloreto não afetam as propriedades físicas dos compósitos produzidos com madeiras das duas espécies do gênero *Eschweilera* estudadas neste capítulo.
- O uso do aditivo $CaCl_2$ resulta em compósitos com melhores valores de propriedades mecânicas quando produzidos com partículas de *Eschweilera coriaceae* do que o uso do aditivo $MgCl_2$. Contudo o mesmo comportamento não é observado quando se utiliza partículas de *Eschweilera odora*, espécie de maior índice de inibição a pega do cimento.
- O uso da cal hidratada como aditivo, de acordo com a metodologia proposta neste experimento, não é favorável à produção de compósitos madeira-cimento por vibro-compactação.

5.5. REFERÊNCIAS

ALVINO, F. O., SILVA, M. F., RAYOL, B. P. Potencial de uso das espécies arbóreas de uma floresta secundária, na Zona Bragantina, Pará, Brasil. **Acta Amazonica**. v.35. n. 4. p.413-420. 2005

ANGST, U., ELSENER, B., LARSEN, C. K., VENNESLAND, O. Critical chloride content in reinforced concrete - a review. **Cement and concrete research**. v. 39. p.1122-1138. 2009.

DAL RI, M. **Efeitos da Adição de Cal Hidratada em Concretos com Altos Teores de Adição Mineral na Penetração de Cloretos e na Solução Aquosa dos Poros de Concreto**. 2002. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 310**. Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 317**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira – Determinação do inchaço na espessura depois da imersão em água. 1993

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 319**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira – determinação da força da tensão perpendicular sobre a superfície plana da placa. 1993

NCL INDUSTRIES LTD. **Bison panel - Cement bonded particle board**. Abids, 2011. Catálogo

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa massa específica produzido com compactação vibro dinâmica**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. 172p.

QUEIROZ, C. R. A. A., MORAIS, S. A. L., NASCIMENTO, E. A. Caracterização dos taninos da Aroeira-Preta (*Myracrodruon urundeuva*) **Revista Árvore**. v. 26. n.4. p. 485-492. 2002

RAMACHANDRAN, V. S. Accelerators. In: RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete admixtures handbook - properties, science and technology**. Segunda edição. Noyes. New Jersey. p. 185 - 285. 1995.

SEMPLE, K. E., EVANS, P., D. Screening inorganic additives for ameliorating the inhibition of hydration of Portland cement by the heartwood of *Acacia mangium*. In: EVANS, P. D. **Wood-cement composites in the Asia-Pacific region**. Cambera: ACIAR Proceedings n. 107. p. 29-39. 2002

SIMATUPANG, M. H. Der Wasserbedarf bei der Herstellung zementgebunder Holzspanplatten. **Holz als Roh-und Werkstoff**. v. 27. p.379-382. 1979.

STEEGE, H., PITMAN, C. A., PHILLIPS, O. L., CHAVE, J., SABATIER, D., DUQUE, A., MOLINO, J., PRÉVOST, M., SPICHIGER, R., CASTELLANOS, H., HILDEBRAND, P., VÁSQUEZ, R. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. **Nature**. v. 443. p. 444-447. 2006

VILELA, E., DU PASQUIER, B. Determinación del coeficiente de aptitud de un grupo de maderas para su posible aplicación em la fabricación de tableros de papilla de madera y cemento. **Revista Forestal Venezolana**. v.11. n. 16. p. 75-84. 1968

WEI, Y. M., ZHOU, Y. G., TOMITA, B. Study of hydration behavior of wood cement-based composite II: effect of chemical additives on the hydration characteristics and strengths of wood-cement composites. **Journal of wood science**. v. 46. p. 444-451. 2000.

6. COMPARAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO DE *Pouteria guianensis* PRODUZIDOS POR VIBRO-COMPACTAÇÃO E POR PRENSA DE PRATOS.

6.1. INTRODUÇÃO

O processo de compactação por vibração consiste essencialmente na eliminação do ar presente na mistura e por forçar as partículas a se assentarem mais próximas. O problema mais comum que pode ocorrer nos casos de vibração é a compactação não uniforme. Isso pode ocorrer devido a uma vibração inadequada ou excessiva, que causa segregação na mistura (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Vibradores criam uma força vibratória na mistura de cimento e partículas devido a combinação de frequência e amplitude. Frequência é o número de ciclos de vibração por minuto e é expressa em "rpm" ou "vpm". A amplitude é o tamanho do raio do ciclo de vibratório. Enquanto que a frequência movimenta partículas menores mais eficientemente, a amplitude age em partículas mais pesadas.

Um dos métodos de compactação de concreto por vibração, que foi adaptado para a formação de painéis madeira-cimento é o da mesa vibratória. Esse método consiste em um vibrador conectado em suporte flexível onde é posicionado um molde preenchido com o concreto. Geralmente, pesos com uma rápida rotação excêntrica faz a mesa vibrar com movimentos circulares, mas ao colocar duas partes rotacionando em direções opostas, o componente horizontal da vibração pode ser neutralizado, e a mesa passa a transmitir um movimento harmônico simples apenas na direção vertical (NEVILLE; BROOKS, 2010). Quando ligada, a mesa usa uma considerável proporção do trabalho vibrando o molde, que deve ser resistente e rígido para evitar distorções e vazamentos.

Para concretos, a frequência usada nas mesas varia entre 25 e 120 Hz e a amplitude é tal que uma aceleração de 4 a 7 g pode ser alcançada. O ideal é se usar uma frequência crescente e uma amplitude decrescente durante o processo de consolidação porque o movimento induzido deve corresponder ao espaçamento das partículas. Após uma compactação parcial, o uso de uma frequência mais alta permite um maior número de movimentos de ajuste. Vibrações de amplitude muito alta em relação aos espaços entre as partículas resulta em uma mistura em estado de movimentação constante e a compactação integral nunca é alcançada. Porém,

não é possível prever qual é a amplitude e a frequência ótimas para uma determinada mistura (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Neste capítulo buscou-se indicar possíveis diferenças e correlações entre a produção de compósitos madeira cimento produzidos pelo método de vibro-compactação com diferentes tamanhos de moldes. Também foi objetivo deste capítulo comparar as propriedades entre compósitos produzidos na mesa vibratória com compósitos produzidos pelo método tradicional de prensa de pratos.

Para a produção dos compósitos, foram utilizadas partículas da espécie *Pouteria guianensis* Aubl. De acordo com o capítulo 3, esta espécie apresenta um índice de inibição médio de 6,4 após tratamentos com água fria, sendo que, segundo Okino *et al* (2005), valores abaixo de 10 são considerados de baixa inibição e aptos para a produção de painéis madeira-cimento. No capítulo 4, os corpos de prova de madeira-cimento produzidos com a espécie pelo método de adensamento por vibro-compactação também foram classificados como medianos. Dentre as espécies não recomendadas para o uso na produção de corpos de prova com esta metodologia, os que utilizaram *P. guianensis* foram os que atingiram valores médios de propriedades físicas e mecânicas mais próximos das do grupo de madeiras indicadas. Sendo que os valores médios de ligação interna, MOR, inchamento em espessura após 2 e 24 horas e absorção de água após 2h foram estatisticamente semelhantes aos dos melhores tratamentos. Assim sendo, pode-se levantar a questão de que o uso de diferentes metodologias de produção pode vir a tornar apto o uso desta espécie para a produção de compósitos madeira-cimento.

6.2. MATERIAIS E MÉTODOS

6.2.1. Preparo das partículas

Uma árvore da espécie *Pouteria guianensis* Aubl., com DAP de 32 cm e altura de 16,1 m, foi abatida na Reserva Biológica do Cuieiras, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, situada no estado do Amazonas. As costaneiras foram enviadas para o Laboratório de Painéis de Madeira, da Universidade Federal do Paraná - UFPR, onde foram descascadas.

A madeira foi mantida submersa em água fria por um período de 7 dias para que fosse possível a geração de partículas através do picador de disco com menor dano possível às facas devido a alta massa específica da espécie. O período de imersão também foi utilizado para extrair substâncias solúveis em água fria que podem ser consideradas inibidoras da cura do cimento, para isso a água foi trocada diariamente para evitar saturação do meio.

As partículas geradas no picador de disco foram secas em duas etapas antes de serem submetidas ao moinho de martelo. As partículas saturadas foram inicialmente expostas ao sol para a redução inicial do teor de umidade. A segunda etapa da secagem foi conduzida em estufa convencional com circulação de ar forçada a temperatura de 80°C por um período de 24 horas, reduzindo o teor de umidade para aproximadamente 3%.

Após a moagem, as partículas foram classificadas por peneiramento automático. Os painéis foram produzidos com as partículas retidas entre as peneiras com aberturas de 2,36 e 1,40mm.

6.2.2. Produção de compósitos madeira-cimento

O cimento utilizado neste experimento foi o Portland tipo CP II-Z. A mistura de madeira:cimento seguiu a relação 1:2,75 (baseado no peso seco das partículas) e a quantidade de água utilizada foi calculada através da equação:

$$H_2O = (C \times 0,5) + (M \times (0,3 - TU\%)) \text{ (g)}$$

SENDO: C o peso do cimento (g), M o peso das partículas (g) e TU% o teor de umidade das partículas.

Para os compósitos produzidos pelo método de vibro-compactação houve um acréscimo de mais 15% de água em relação ao peso seco do cimento. Essa diferença na quantidade de água deve-se ao fato de que neste processo não há pressão nas partículas e assim a água dentro da madeira não é disponibilizada para a reação com o cimento, o que acarreta em uma mistura mais seca do que quando utiliza-se a prensa de pratos.

O acelerador de cura do cimento cloreto de cálcio (CaCl_2) foi adicionado à mistura, na quantidade de 3% em relação ao peso seco do cimento.

Os compósitos foram produzidos com três diferentes metodologias que seguem o delineamento experimental apresentado na tabela 6.1.

TABELA 6.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Tratamento	Método	Dimensão
T1	Vibro-compactação	42 x 7 x 1,5 cm
T2	Vibro-compactação	55 x 45 x 1,5 cm
T3	Prensa de pratos	50,5 x 38,5 x 1,5 cm

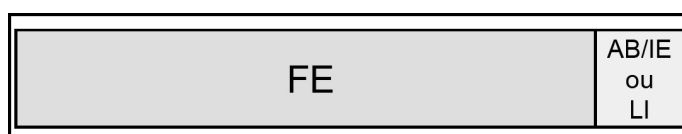
FONTE: O autor (2015)

a) Método de adensamento por vibro-compactação - T1

Foram produzidos moldes de compensado com a dimensão de 42 cm de comprimento, 7 cm de largura e 1,5 cm de espessura, semelhantes aos utilizados para a produção dos compósitos relatados no capítulo 4. Uma vez preenchidos com a mistura madeira:cimento:água, os moldes foram então submetidos à mesa vibratória com uma carga de impacto vertical equivalente a 220 N à 3.000 RPM por 30 segundos, como sugerido por Parchen (2012). Com a vibração, ocorre a sedimentação do material. O molde então foi preenchido novamente com mais mistura e novamente submetido à vibração. Este processo foi repetido até todo o material preparado ser aplicado, ou até não haver mais espaço no molde, mesmo após à vibração.

A mistura foi mantida dentro do molde por 7 dias. Após esse período, o molde foi desmontado e os corpos de prova mantidos em ar livre no período restante para se completar os 28 dias de cura.

Foram produzidos 12 corpos de prova que, após a cura, foram cortados com serra diamantada para que as dimensões atendessem as normas européias para teste de propriedades físicas e mecânicas como esquematizado na figura 6.1.



SENDO: FE - corpos de prova para Flexão estática; AB/IE - corpos de prova para absorção de água e inchamento em espessura; e LI - corpos de prova para ligação interna.

FIGURA 6.1. ESQUEMA PARA CORTE DE CORPOS DE PROVA

FONTE: O autor (2015)

b) Método de adensamento por vibro-compactação - T2

A produção de painéis por vibro-compactação seguiram a metodologia semelhante ao dos corpos de prova do tratamento T1. A principal diferença entre os tratamentos foi as dimensões do molde prismático. Para a produção de painéis o molde possuía 55 cm de comprimento, 45 de altura e 1,5 cm de espessura, como representado na figura 6.2.

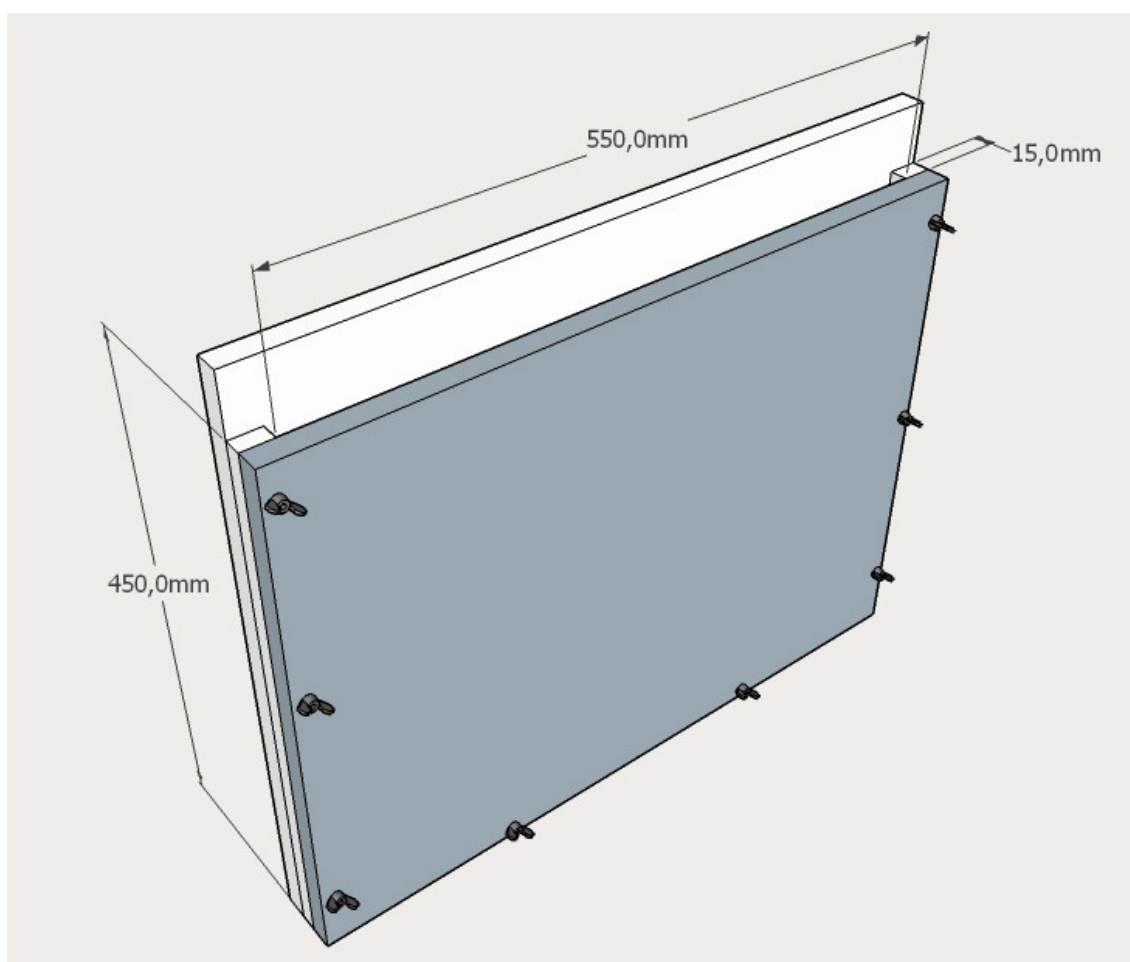
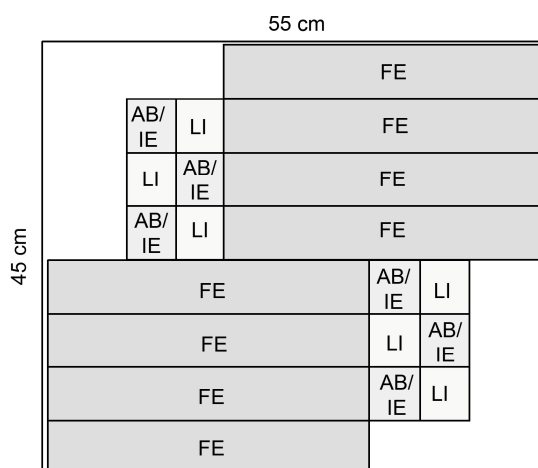


FIGURA 6.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MOLDE UTILIZADO PARA A FORMAÇÃO DE COMPOSTOS DO TRATAMENTO T2

FONTE: O autor (2015)

Os compostos foram mantidos no molde por 7 dias, desenformados e mantidos ao ar livre pelos próximos 21 dias, até completarem os 28 dias de cura do cimento. Os painéis foram então cortados com serra diamantada para obtenção de corpos de prova seguindo o esquema representado na figura 6.3.



SENDO: FE - corpos de prova para Flexão estática; AB/IE - corpos de prova para absorção de água e inchamento em espessura; e LI - corpos de prova para ligação interna.

FIGURA 6.3. ESQUEMA DE CORTES DE CORPOS DE PROVA PARA PAINÉIS PRODUZIDOS PELO MÉTODO DE ADENSAMENTO POR VIBRO-COMPACTAÇÃO

FONTE: O autor (2015)

c) Método de prensa de pratos - T3

Foram calculadas as quantidades e pesadas as partículas, água, cimento e aditivo químico relativos ao equivalente para produção de três painéis de massa específica nominal de $1,20 \text{ g/cm}^3$. A madeira e o cimento foram misturados em uma betoneira, sendo o CaCl_2 diluído na água que foi aplicada gradativamente com auxílio de uma bomba aspersora.

Após a homogeneização do material, a massa total de cada painel foi pesada e distribuída em uma caixa formadora com dimensões de 38,5 cm de largura por 50,5 cm de comprimento. Ainda na caixa, a mistura foi pré-prensada manualmente antes de ser retirada e colocada na prensa. Duas barras de ferro de 1,5 cm foram colocadas no sentido do comprimento do colchão para garantir a espessura final do painel. Separada por chapas de alumínio untadas com óleo diesel, um segundo e um terceiro colchão foram sobrepostos.

A prensa foi então fechada a uma pressão de 40 kg/cm^2 . A pressão foi mantida, sem presença de calor, por aproximadamente 1 hora. Uma vez que a espessura mostrou-se estável, foi efetivado o grampeamento. O grampeamento consiste em manter o painel sob pressão constante por 24 horas após a abertura da prensa. Para tal, foram postos parafusos e roscas ligando duas barras de aço

6.2.4. Determinação das propriedades físicas e mecânicas

A tabela 6.2 apresenta os testes físicos e mecânicos, que foram realizados para os três tratamentos, seguidos da quantidade de corpos de prova e da respectiva norma europeia que foi seguida. Para o tratamento T1, a quantidade de corpos de prova representa o número total de compósitos produzidos. Para os tratamentos T2 e T3, a quantidade de corpos de prova é por painel.

TABELA 6.2. TESTES DE PROPRIEDADE FÍSICA E MECÂNICA E SUAS RESPECTIVAS NORMAS

Propriedade	Nº de corpos de prova	Norma
Massa específica	6	EN 323 (1993)
Absorção de água após 2 e 24 horas de imersão em água	6	EN 317 (1993)
Inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água	6	EN 317 (1993)
Módulo de elasticidade	8*	EN 310 (1993)
Módulo de ruptura	8*	EN 310 (1993)
Ligação interna	6	EN 319 (1993)

* Para o tratamento T3 foram 7 corpos de prova por painel devido a suas dimensões

6.2.5. Análise estatística

A normalidade dos dados foi caracterizada pelos testes Skewness e Kurtosis. Para as seqüências de dados que estes testes não observaram uma distribuição normal, foi aplicado o método de Box-Cox de transformação.

Os dados normalizados foram testados por Análise de Variância Multifatorial considerando a massa específica do compósito como variável concomitante, caso o valor-p tenha sido abaixo de 5%. Teste de comparação de média Tukey ao nível de 95% de probabilidade. Para os casos em que a massa específica foi confirmada como uma covariável significativa, o teste Tukey foi conduzido com os valores ajustados para uma massa específica média.

A regressão entre as propriedades físicas e mecânicas e a massa específica final dos compósitos foi ajustado para o modelo que apresentou a maior correlação determinada pelo maior valor de R^2 .

Todos os testes estatísticos foram realizados com auxílio do *software* Statgraphics Centurion XV.

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1. Aparência visual

A figura 6.6 apresenta a aparência visual do compósito do tratamento T1, produzido pelo método de adensamento por vibro-compactação em moldes de 45 x 7 x 1,5 cm de dimensões. A imagem é de um corpo de prova cortado dentro das medidas exigidas para os testes de flexão estática.

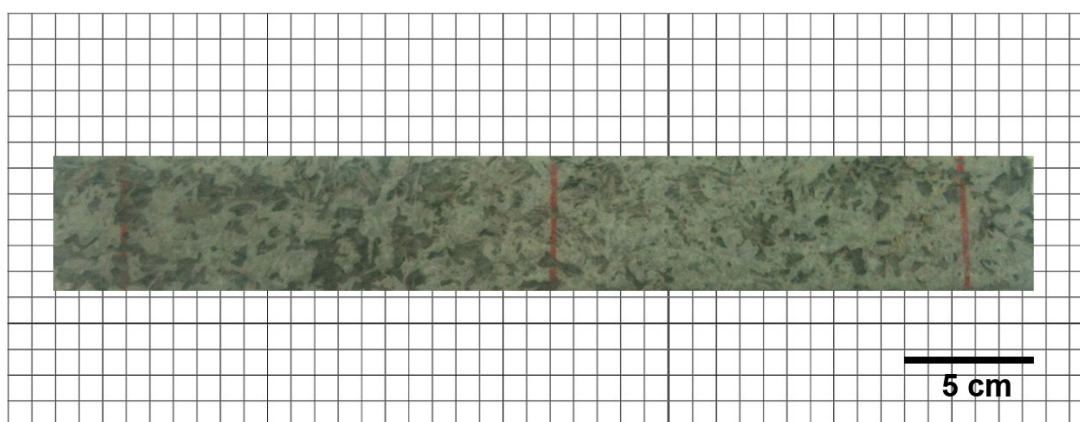


FIGURA 6.6. FOTOGRAFIA DE UM CORPO DE PROVA DO TRATAMENTO T1.
FONTE: O autor (2015)

A imagem apresenta um compósito com uma superfície visualmente homogênea, com poucas falhas e regularmente distribuída no sentido vertical. Não é possível identificar linhas de transição para os momentos em que o molde foi reabastecido com a mistura entre os períodos de vibração.

A figura 6.7 apresenta a imagem de um painel do tratamento T2, produzido pelo método de vibro-compactação em um molde com dimensões de 55 x 45 x 1,5 cm.

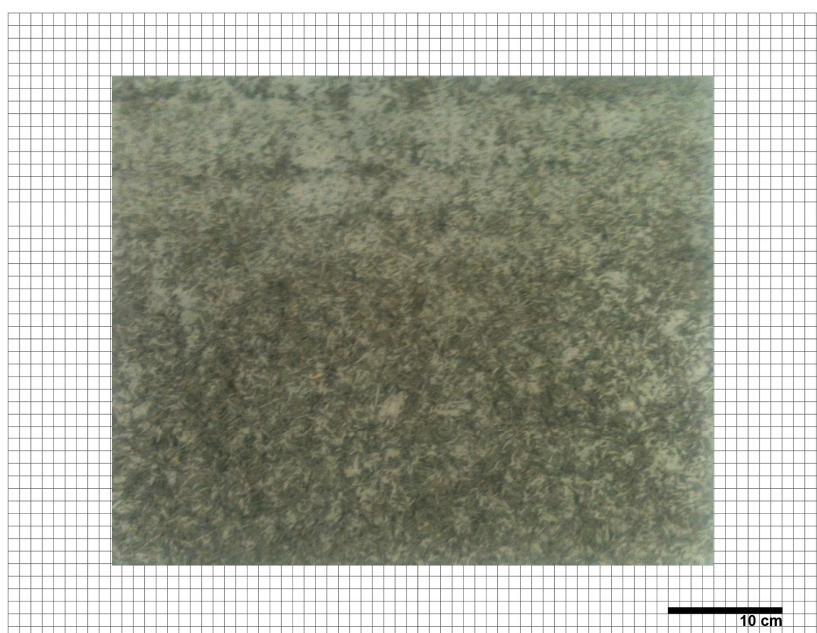


FIGURA 6.7. FOTOGRAFIA DE UM PAINEL DO TRATAMENTO T2.
FONTE: O autor (2015)

Diferentemente do tratamento T1, o tratamento T2 apresentou uma superfície mais irregular. Com o uso de um molde de maiores dimensões, os painéis passaram a apresentar duas regiões críticas de irregularidade, destacadas na figura 6.8.

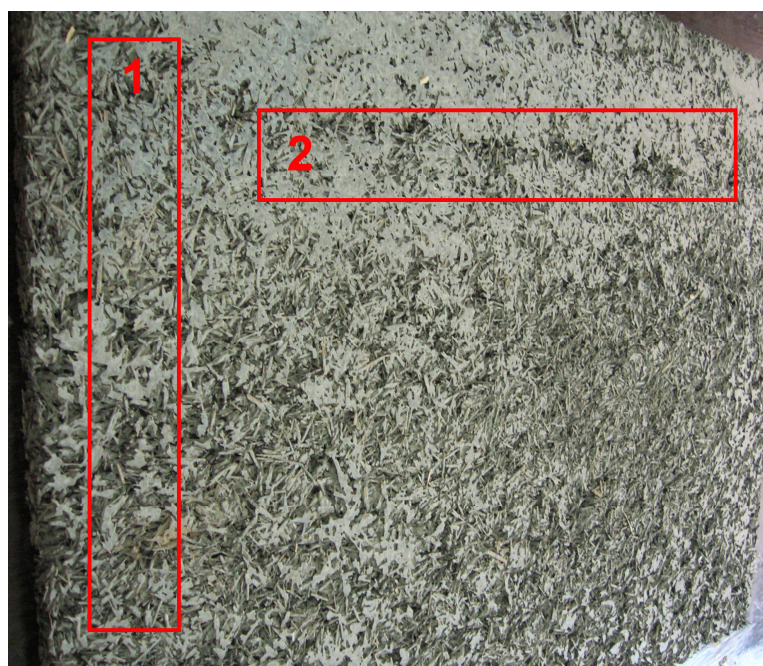


FIGURA 6.8. DETALHES PARA A IRREGULARIDADE DA DISTRIBUIÇÃO DAS PARTÍCULAS NOS PAINÉIS INTEIROS PRODUZIDOS PELO MÉTODO VIBRO-DINÂMICO. 1 - IRREGULARIDADE VERTICAL; 2 - IRREGULARIDADE HORIZONTAL.
FONTE: O autor (2015)

A irregularidade 1 ocorreu no sentido vertical do molde. A mistura tendeu a apresentar uma maior densificação na parte superior do molde. A provável explicação para este fenômeno é o fato de que, no primeiro abastecimento de material, a mistura tem mais espaço para vibrar e se posicionar livremente, enquanto que nos reabastecimentos os espaços passam a ser gradativamente menores, forçando o material a se acomodar mais. A região superior do painel apresentou uma aparência semelhante ao dos corpos de prova do tratamento T1, uma vez que o espaço livre para a mistura passou a ter uma dimensão semelhante ao do molde usado para T1.

A segunda irregularidade foi observada no sentido horizontal. Linhas de transição puderam ser claramente identificadas ao longo do painel. Estas falhas são resultantes do abastecimento descontínuo do material. Nos corpos de prova do tratamento T1, estas falhas não foram evidentes devido à baixa altura do molde, ou seja, não há diferença significativa do espaço livre entre os abastecimentos do material e isso resulta em um comportamento de distribuição semelhante durante todo o processo. No caso do molde maior do tratamento T2, o mesmo fator que gerou as irregularidades no sentido vertical também geraram uma linha de transição no sentido horizontal.

A figura 6.9 apresenta uma terceira fonte de irregularidade nos painéis produzidos pelo método de vibro-compactação: a variação na espessura. Uma vez que há presença de parafusos apenas nas laterais, o material da mistura tende a abaular o compensado do molde. A deformação do molde resultou em painéis com espessura maior na região central da abertura do molde do que nas regiões perto dos parafusos.

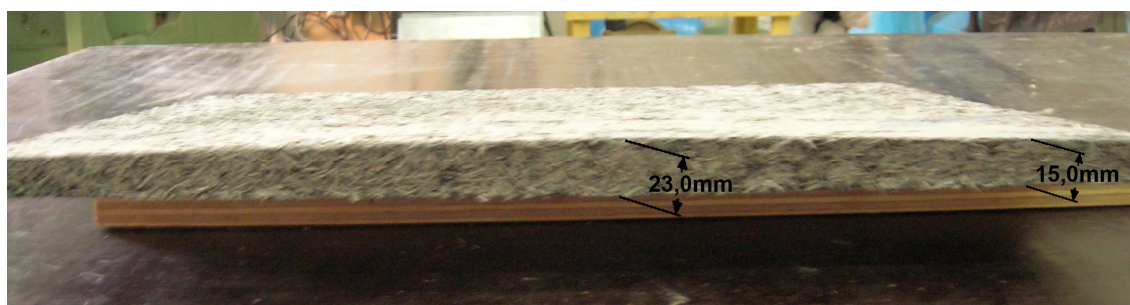


FIGURA 6.9. VARIAÇÃO DE ESPESSURA NO PERFIL DE PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS PELO MÉTODO VIBRO-DINÂMICO
FONTE: O autor (2015)

A figura 6.10 apresenta a fotografia de um painel produzido pelo método tradicional da prensa de pratos.

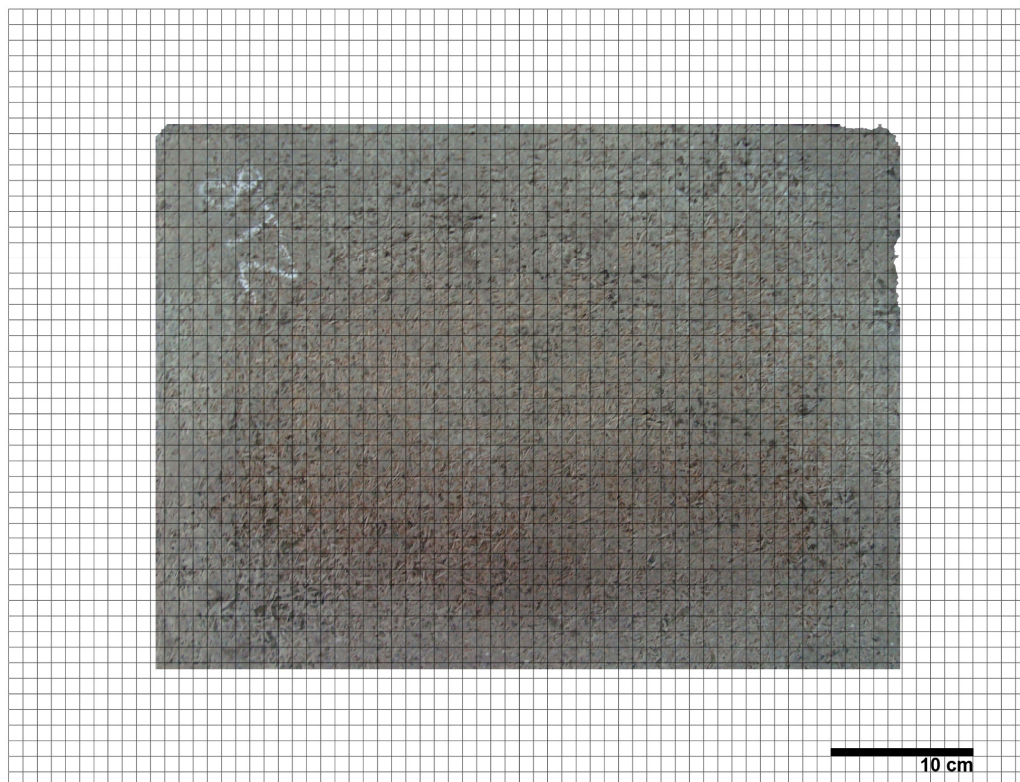


FIGURA 6.10. FOTO DO COMPÓSITO PRODUZIDO POR PRENSA DE PRATOS (T3)
FONTE: O autor (2015)

Os painéis produzidos pelo método de prensa de pratos apresentaram uma aparência visual mais regular do que os produzidos pelo adensamento por vibrocompactação. Como pode ser observado na figura 6.11, os painéis T3 também apresentaram uma variação de espessura entre o centro e as laterais, porém menos crítica do que os painéis T2.

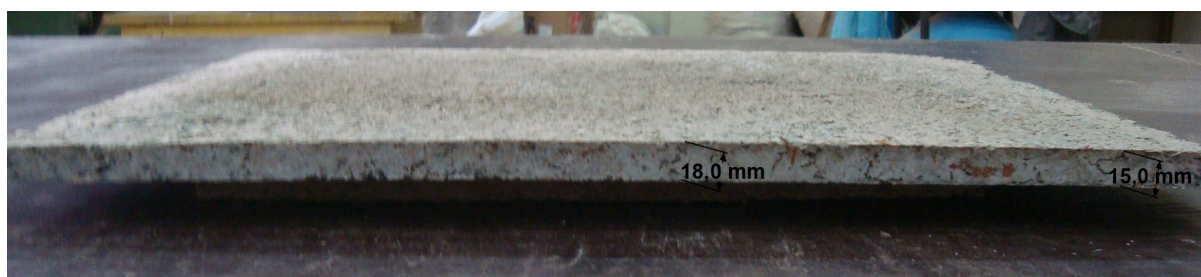


FIGURA 6.10. VARIAÇÃO DE ESPESSURA NO PERFIL DE PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS PELO MÉTODO DA PRENSA DE PRATOS.
FONTE: O autor (2015)

6.3.2. Propriedades físicas

A tabela 6.3 apresenta as médias dos resultados das propriedades físicas dos três tratamentos estudados neste capítulo.

TABELA 6.3. PROPRIEDADE FÍSICAS DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS.

Tratamentos	Massa específica (g/cm ³)	AA 2h (%)	AA 24h (%)	IE 2h (%)	IE 24h (%)
T1	1,10 (1,96)	19,79 (7,58)	22,28 (5,59)	0,30 (66,74)	0,41 (49,07)
T2	0,95 (5,81)	18,35 (13,35)	20,43 (9,66)	0,24 (71,74)	0,38 (48,74)
T3	1,17 (4,32)	13,86 (10,90)	15,82 (8,29)	0,41 (55,80)	0,65 (47,39)

SENDO: AA, absorção de água após 2 ou 24 horas; e IE, o inchamento em espessura após 2 e 24 horas; Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

As irregularidades observadas na aparência do tratamento T2 podem ser observadas em um maior coeficiente de variação da massa específica do que os demais tratamentos.

A figura 6.11 apresenta o gráfico com o teste de diferença de médias de Tukey para as massa específicas dos compósitos. Colunas acompanhadas com letras diferentes indicam a diferença estatística entre médias.

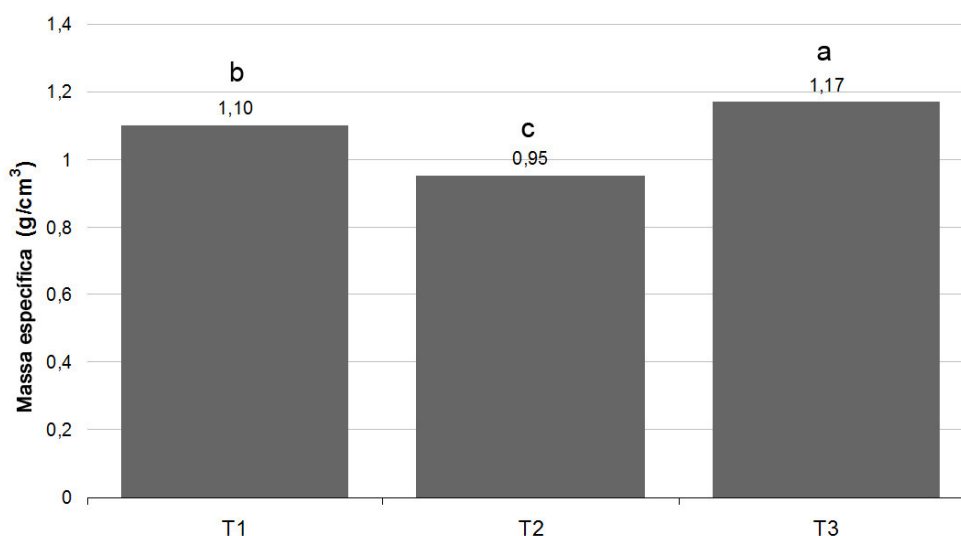


FIGURA 6.11. MASSA ESPECÍFICA MÉDIA DOS COMPÓSITOS
 FONTE: O autor (2015)

Os três tratamentos apresentaram massa específicas distintas. A maior massa específica foi apresentada pelo tratamento T3. Esta média foi dentro do esperado, uma vez que para este tratamento a massa específica nominal foi de 1,20 g/cm³. Para o método de prensa de prato, não é possível alcançar valores mais baixos de massa específica se for considerada a espécie utilizada e a espessura do painel. Uma quantidade menor de material ocasionaria em um colchão mais fino do que os espessadores de 1,5 cm.

Como foi observado no capítulo 4, para o método de vibro-compactação, a massa específica do compósito é uma resultante direta da massa específica da madeira e da área superficial das partículas. Como não há pressão neste método, não é possível programar a massa específica obtida pelos compósitos. A diferença estatística entre os corpos de prova de T1 e T2 ocorreu devido ao espaço livre para as partículas vibrarem. Espaços maiores presentes no molde de T2 permitiram uma acomodação de material mais espaçada que resultou em um compósito mais leve do que os demais.

A figura 6.12 apresenta as médias obtidas para absorção de água 2 e 24 após imersão. Dentro de um mesmo gráfico, colunas com letras semelhantes indicam que não houve diferença estatística entre médias ao nível de 5% de probabilidade. O teste de média de Tukey foi realizado após ajuste de médias considerando a massa específica como um fator covariante.

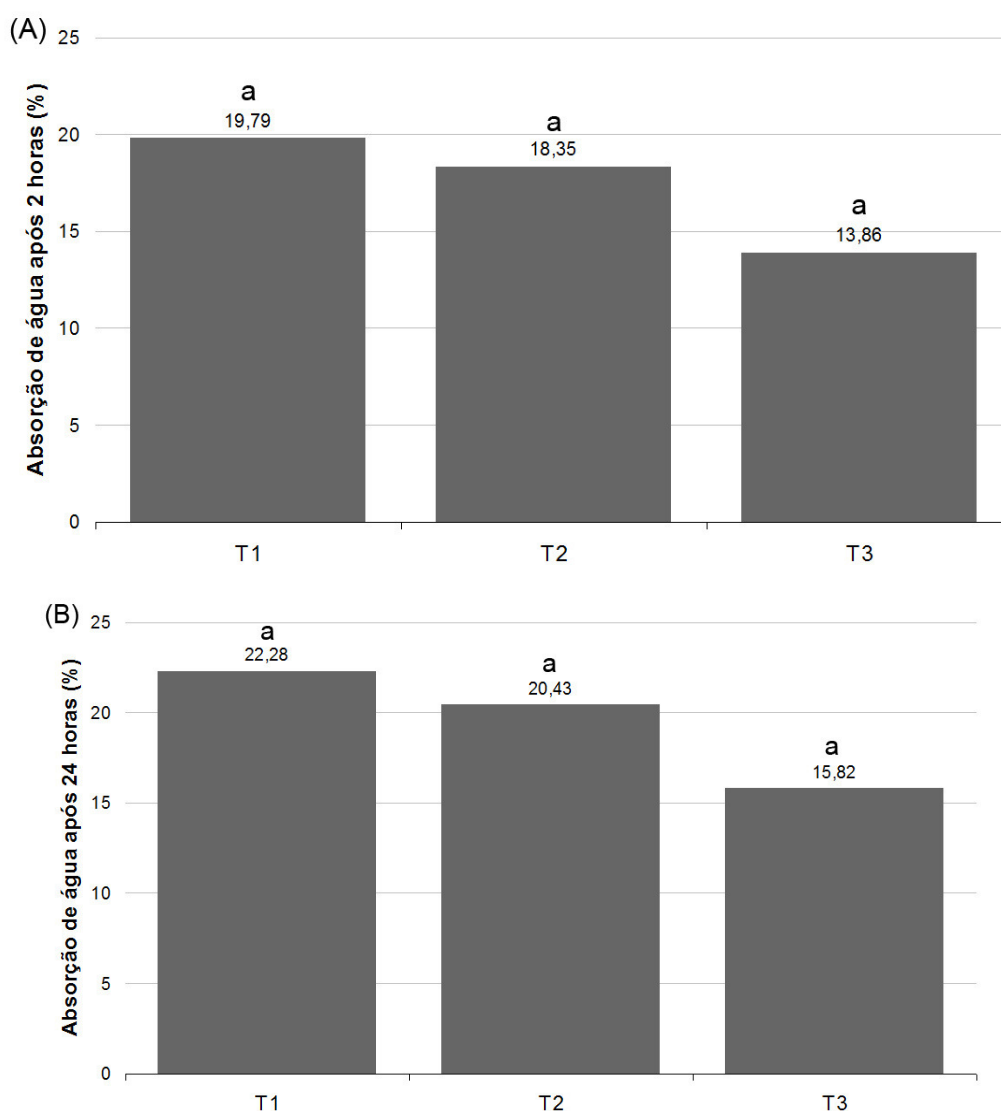


FIGURA 6.12. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 2 E 24 HORAS DE IMERSÃO. FONTE: O autor (2015)

Uma vez ajustado às diferentes massa específicas, os compósitos apresentaram médias estatisticamente iguais para a propriedade física de absorção de água tanto após 2 horas quanto após 24 horas de imersão. A absorção de água dos três tratamentos de *Pouteria guianensis* foi menor do que a encontrada na literatura para painéis produzidos com outras espécies tropicais. Macedo *et al.* (2012) encontrou uma média de 26,7% de absorção de água após 24 horas para painéis produzidos com *Cedrela odorata* L., 26,7% com *Hymenaea courbaril* L. e 30,7% com *Vochysia maxima* Ducke. Estes valores foram encontrados pelos autores

para painéis produzidos com uma relação madeira:cimento de 1:3, com 5% de adição de CaCl_2 e utilizando uma metodologia de produção semelhante a utilizada no tratamento T3.

Na figura 6.13, são apresentados os gráficos de inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água. Letras semelhantes dentro de um mesmo gráfico indica que não houve diferença estatística entre médias pelo teste de Tukey quando considerado a massa específica um fator covariante.

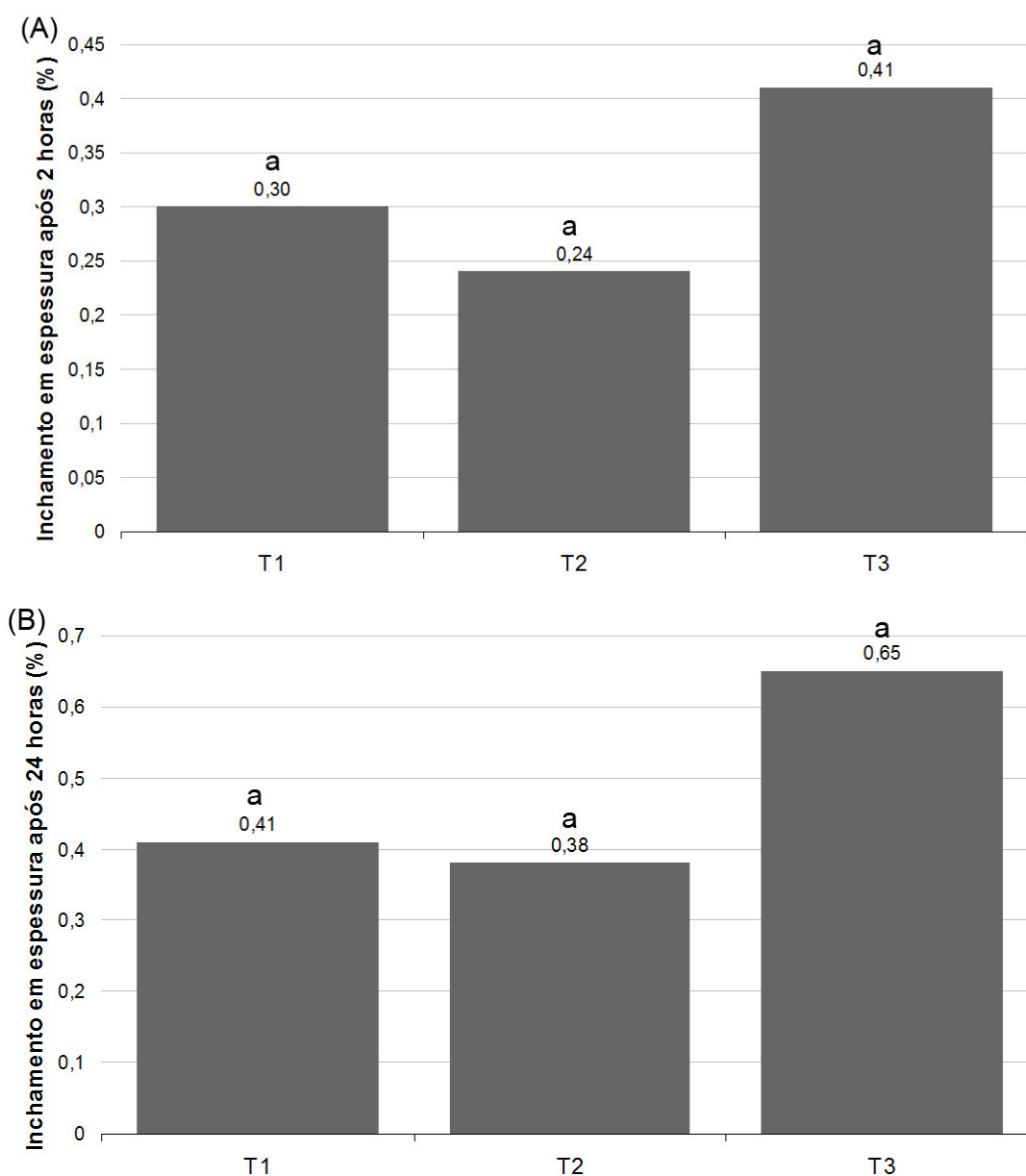


FIGURA 6.13. VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 2 E 24 HORAS DE IMERSÃO.

FONTE: O autor (2015)

Independente da massa específica final dos compósitos, todos os tratamentos apresentaram um baixo valor médio de inchamento em espessura. O requisito para painéis comerciais *BISON* é de um inchamento no máximo de 1% após 2 horas e 1,5% após 24 horas (NCL INDUSTRIES LTD., 2011). Painéis *BISON* são produzidos com espécies de crescimento rápido, como *Eucalyptus*, com uma relação madeira:cimento de aproximadamente 1:2,2 e produzidos sob pressão.

Quando a massa específica foi levada em consideração como uma covariante, os resultados passaram a apresentar valores médios estatisticamente iguais a um grau de probabilidade de 95%. Ou seja, o método de produção não afetou a estabilidade dimensional dos compósitos.

6.3.3. Propriedades mecânicas

A tabela 6.4 apresenta os valores médios obtidos para as propriedades mecânicas dos compósitos estudados neste capítulo.

TABELA 6.4. PROPRIEDADE MECÂNICAS DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO PRODUZIDOS COM ESPÉCIES TROPICAIS.

Espécie	LI (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
T1	0,46	2,68	1669
	(21,39)	(33,29)	(22,01)
T2	0,49	1,31	809
	(26,14)	(55,73)	(55,51)
T3	0,51	3,58	2343
	(28,37)	(20,43)	(24,84)

SENDO: LI, ligação interna; MOR, módulo de ruptura; MOE, módulo de elasticidade; Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

As irregularidades no sentido vertical e horizontal dos painéis do tratamento T2 refletiram em um alto valor de coeficiente de variação para os valores de flexão estática.

A figura 6.14 apresenta os valores médios de ligação interna para os três tratamentos, sendo que cada coluna é acompanhada por uma letra que indica o resultado do teste de Tukey a um grau de probabilidade de 95%. Colunas

acompanhadas de uma mesma letra indicam valores médios estatisticamente semelhantes.

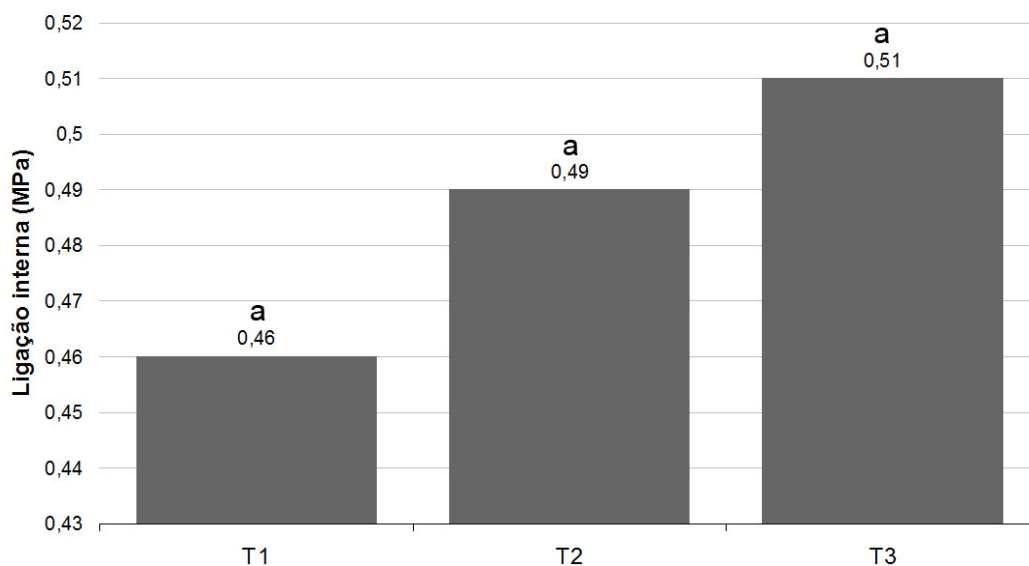


FIGURA 6.14. VALORES MÉDIOS DE LIGAÇÃO INTERNA
 FONTE: O autor (2015)

Para a propriedade de ligação interna, não foi observada diferença estatísticas entre as médias da propriedade de ligação interna para todos os métodos de produção. Sendo que os valores médios foram suficientes para atender ao requisito mínimo de 0,40 MPa exigido para painéis comerciais (NCL INDUSTRIES LTD., 2011).

A figura 6.15 apresenta o gráfico com as diferenças na média dos valores de MOR para os três tratamentos. Colunas acompanhadas de mesma letra indicam que não houve diferença estatística entre as médias.

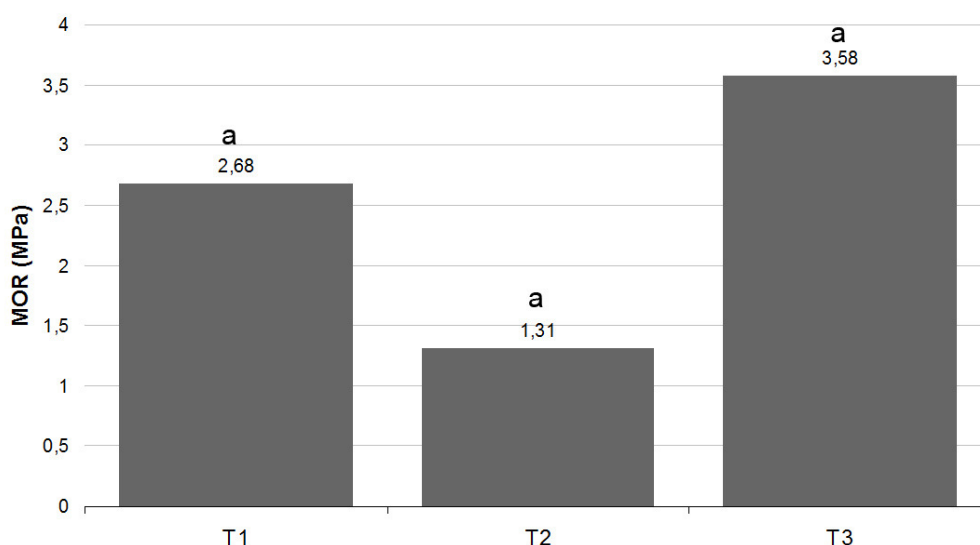


FIGURA 6.15. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE RUPTURA
 FONTE: O autor (2015)

Não houve diferença estatística entre os valores médios de MOR uma vez que o fator massa específica foi considerado um covariante. Painéis produzidos com a espécie *Pouteria guianensis* pelo método tradicional de prensa de pratos (tratamento T3) apresentou uma baixa resistência à ruptura quando comparada com outros painéis de outras espécies tropicais produzidos com metodologia semelhante relatados na literatura. Fuwape e Oyagade (1993) apresentaram um valor médio de 9 MPa de MOR para painéis com massa específica de $1,2 \text{ g/cm}^3$ usando partículas de *Terminalia superba* na proporção madeira:cimento de 1:2,3 e 3% de CaCl_2 . Macedo *et al.* (2012) encontraram valores médios de MOR de 9,10 e 7,56 MPa para painéis de *Cedrela odorata* e *Vochysia maxima*, respectivamente. Contudo, os mesmos autores relataram uma média geral de 4,21 MPa para MOR de painéis de *Hymenaea courbaril*, sendo que em uma das repetições o resultado médio foi de 3,69 MPa, valor semelhante ao encontrado para o tratamento T3.

A figura 6.16 apresenta os valores médios obtidos e suas diferenças estatísticas apontada pelo teste de Tukey para o módulo de elasticidade. Letras iguais sobre as colunas indicam semelhança estatística entre as médias.

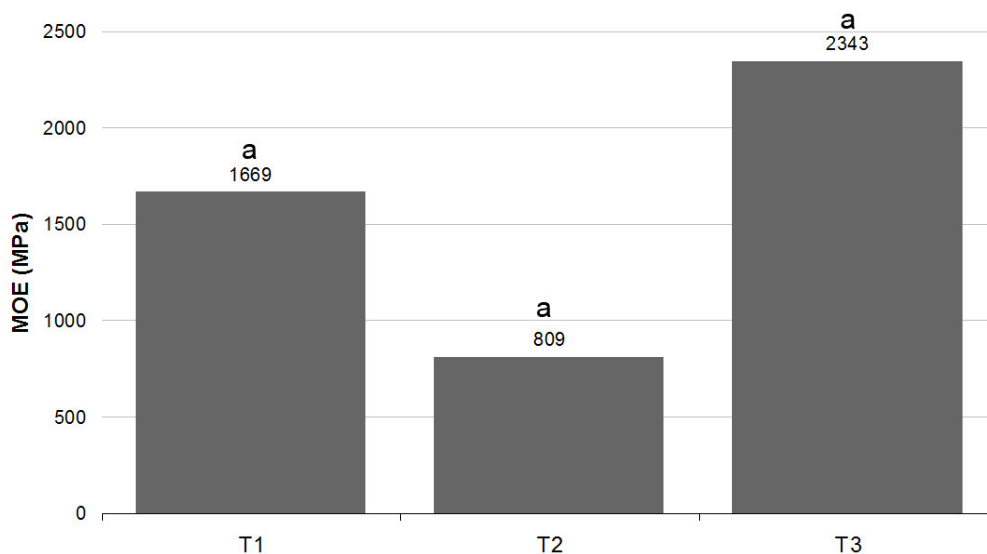


FIGURA 6.16. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE.
FONTE: O autor (2015)

Não houve diferença estatística entre os tratamentos quando a massa específica do compósito foi considerada uma covariável. Os valores médios de MOE foram abaixo do requisito mínimo para painéis madeira-cimento comerciais produzidos pelo método tradicional, 3.000 MPa (NCL INDUSTRIES LTD., 2011).

6.3.4 . Equações de regressão

Uma vez que não houve diferença estatística entre tratamentos para os valores médios de todas as propriedades, a tabela 6.5 apresenta a regressão linear entre as propriedades e a massa específica.

TABELA 6.5. EQUAÇÕES DE REGRESSÃO INDICANDO A RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS E A MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS

Propriedade	Equação	R ² (%)
Absorção de água após 2 horas	$AA_{2h} = \frac{1}{(0,0240252 + 0,0330298 \times me^2)}$	48,06
Absorção de água após 24 horas	$AA_{24h} = \frac{1}{(0,0240192 + 0,0266786 \times me^2)}$	50,48
Inchamento em espessura após 2 horas	$IE_{2h} = -0,239497 + 0,477297 \times me^2$	26,08

continua

TABELA 6.5. EQUAÇÕES DE REGRESSÃO INDICANDO A RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS E A MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS

Propriedade	Equação	conclusão
		R ² (%)
Inchamento em espessura após 24 horas	$IE_{24h} = -0,245526 + 0,641687 \times me^2$	29,11
Ligação interna	$LI = \sqrt{(0,0887512 + (0,157049 \times me^2))}$	9,36
Módulo de ruptura	$MOR = (3,91753 - (\frac{2,4451}{me})^2$	74,83
Módulo de elasticidade	$MOE = (102,413 - (\frac{65,4942}{me})^2$	71,65

FONTE: O autor (2015)

Para as propriedades físicas e para a ligação interna, não foi possível determinar uma forte correlação com a massa específica. Entretanto, a correlação foi mais significativa para as propriedades de MOR e MOE, com valores de R² acima de 70%. A importância desta previsão é fundamental nos casos de compósitos produzidos por adensamento por vibro-compactação. É possível testar compósitos formados pelo método T1, que devido as menores dimensões dos moldes formadores, exigem menor quantidade de material e são de mais fácil manuseio, e ter os valores de MOE e MOR calculados para painéis de maior dimensões de acordo com a variação de suas massa específicas finais.

6.4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas para compósitos de madeira de *Pouteria guianensis* e cimento produzidos por diferentes metodologias:

- O método de adensamento por vibro-compactação produzir compósitos madeira-cimento de menor massa específica do que os produzidos pelo método tradicional de prensa de pratos;
- O tamanho do molde utilizado para formação dos painéis por vibro-compactação afeta a massa específica final dos compósitos.

- Para formação de painéis de maior dimensão pelo método de vibração, a metodologia deve ser aprimorada com o intuito de se eliminar irregularidades no sentido horizontal e vertical do painel. Estas irregularidades são resultantes do abastecimento parcelado de material no molde. Sugere-se o futuro desenvolvimento de um método em que todo o material seja depositada de uma só vez para se evitar linhas de falhas.

6.5. REFERÊNCIAS

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 310**. Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 317**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira – Determinação do inchaço na espessura depois da imersão em água. 1993

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 319**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira – determinação da força da tensão perpendicular sobre a superfície plana da placa. 1993

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 323**. Wood-based panels – Determination of density. 1993.

FUWAPE, J. A., OYAGADE, A. O. Bending strength and dimensional stability of tropical wood-cement particleboard. **Bioresource Technology**. v. 44. p. 77-79. 1993

MACEDO, A. N., SOUZA, A. A. C., POMPEU NETO, B. B. Chapas de cimento-madeira com resíduos da indústria madeireira da região amazônica. **Ambiente Construído**, Porto Alegre. v. 12. n. 2. p. 131-150. 2012

MOSLEMI, A. A. Particle geometry *in*: MOSLEMI, A. A. **Particleboard. Vol.1: Material**. Souther Illinois University. p. 49 - 67. 1974

NCL INDUSTRIES LTD. **Bison panel - Cement bonded particle board**. Abids, 2011. Catálogo

NEVILLE, A. M., BROOKS, J.J. **Concrete technology**. Segunda Edição. Pearson Education Limited. 442p. 2010

OKINO, E. Y. A., SOUZA, M. R., SANTANA, M. A. E., ALVES, M. V. S, SOUZA, M. E, TEIXEIRA D. E. Physico-mechanical properties and decay resistance of *Cupressus* spp. cement-bonded particleboards. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdam, v. 27. p.333-338, 2005

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa massa específica produzido com compactação vibro dinâmica**. Tese de doutorado em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. 172p.

PEREIRA, D. SANTOS, D., VEDOVETO, M., GUIMARÃES, J., VERÍSSIMO, A. **Fatos florestais da Amazônia**. Belém: IMAZON. 2010. 124p.

VILELA, E., DU PASQUIER, B. Determinación del coeficiente de aptitud de un grupo de maderas para su posible aplicación em la fabricación de tableros de papilla de madera y cemento. **Revista Forestal Venezolana**. v.11. n. 16. p. 75-84. 1968

WOLFE, R. W., GJINOLLI, A. Cement-bonded wood composites as an engineering material. In: The use of recycled wood and paper in building applications, 1996, Madison. **Proceedings...** Madison: Forest Products Society. 1997. p. 84-91.

7. PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO PELO MÉTODO DE VIBRO-COMPACTAÇÃO COM DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE PARTÍCULAS DE *Swartzia recurva* E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO.

7.1. INTRODUÇÃO

A maior parte das espécies de *Swartzia* Schreber ocorrem na região tropical da América Central e do Sul, sendo frequentemente encontradas na região amazônica, que parece ser o centro de dispersão do gênero. A madeira das espécies deste gênero geralmente apresentam alburno de coloração que varia de marrom amarelado claro ao quase branco que claramente se distingue do cerne que pode ser marrom avermelhado ou marrom escuro. O cerne é duro e pesado e, em alguns casos, semelhante à madeira do Jacarandá (*Dalbergia nigra*) ou do Ébano (*Diospyros* spp.) (ANGYALOSSY-ALFONSO; MILLER, 2002). Steege *et al.* (2006) cita que o gênero *Swartzia* está entre os dez gêneros mais comuns da região amazônica considerando um banco de dados com 277.069 árvores.

De acordo com o capítulo 4, a madeira de *Swartzia recurva* é uma ótima candidata para a produção de compósitos madeira-cimento pelo método de adensamento por vibro-compactação. Contudo, algumas variáveis da nova metodologia proposta ainda suscitam questionamentos, como por exemplo, a relação ideal entre as quantidades de cimento e madeira e a qual a dimensão das partículas de madeira mais favoráveis para a acomodação do material durante a vibração.

A relação entre quantidade de madeira e cimento utilizada nos compósitos devem equilibrar a massa específica final do produto com suas propriedades físicas e mecânicas. Fuwape e Oyagade (1993) estudaram a relação entre a proporção de madeira e cimento e as propriedades de flexão estática de compósitos madeira-cimento produzidos com a madeira tropical *Terminalia superba* para quatro diferentes massa específicas nominais. Os autores observaram que valores médios de MOR e MOE foi superior quando utilizada uma relação madeira:cimento de 1:2,3 em compósitos de alta massa específica (entre 1 e 1,4g/cm³). Porém, quando a massa específica nominal dos painéis foi de 0,8 g/cm³, os resultados passaram a ser

estatisticamente semelhantes quando a quantidade de cimento foi reduzida para uma relação de 1:1,5.

Tradicionalmente as dimensões das partículas utilizadas na produção de compósitos madeira-cimento contribuem diretamente no grau de ligação entre as partículas de madeira e o cimento, e conseqüentemente a resistência à flexão do produto final (OLORUNNISOLA, 2009). FRYBORT *et al.* (2008), em sua revisão de literatura sobre o estado da arte na produção de painéis de madeira-cimento, relatam trabalhos que apontam a necessidade de partículas maiores do que as usadas em painéis de aglomerado principalmente devido ao aspecto econômico de produção. A redução das dimensões do material envolve dois principais custos que podem interferir na viabilidade no produto final. Em primeiro lugar, a fragmentação das partículas de madeira envolvem um gasto energético que pode ser ainda mais crítico no caso de madeiras tropicais de alta massa específica. Além disso, quanto menores as partículas, maior serão suas áreas superficiais e, conseqüentemente, maior a demanda por material aglutinante.

7.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma árvore da espécie *Swartzia recurva* Poepp., popularmente conhecida como Muiragiboia, com 38 cm de DAP e 14,8 m de altura, foi coletada na Reserva Biológica do Cuieiras, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, situada cerca de 60 km a noroeste de Manaus, AM. O material foi processado e as costaneiras foram enviadas para o Laboratório de Painéis de Madeira, da Universidade Federal do Paraná - UFPR, onde foram descascadas e seccionadas em formatos de cubos com lados de aproximadamente 10 cm.

7.2.1. Preparo das partículas

Devido a alta massa específica da espécie ($0,8 \text{ g/cm}^3$), as madeiras seccionadas foram mantidas submersas em água fria por um período de 7 dias para que se fosse possível a geração de partículas através do picador de disco sem danificar as facas. Durante o período de imersão, a água foi trocada diariamente para estimular a extração de substâncias que poderiam vir a ser prejudiciais à pega

do cimento. As partículas geradas no picador de disco foram então secas em duas etapas antes de serem submetidas ao moinho de martelo. As partículas saturadas foram inicialmente expostas ao sol para a redução do teor de umidade. A segunda etapa foi conduzida em estufa convencional com circulação de ar forçada a temperatura de 80°C por um período de 24 horas, reduzindo o teor de umidade para aproximadamente 3%.

Após a moagem, as partículas foram classificadas por peneiramento automático e separadas em três classes de acordo com a malha da peneira em que as partículas foram retidas, como indicada na tabela 7.1.

TABELA 7.1. CLASSIFICAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE MADEIRA

Classe	Peneiras (mm)	
	Limite Inferior	Limite Superior
P1	1,40	2,36
P2	2,36	4,00
P3	4,00	9,52

FONTE: O autor (2015)

7.2.2. Geometria das partículas

Para a determinação da geometria das partículas foi mensurado o comprimento, largura e espessura de 100 partículas por espécie com o auxílio de um paquímetro digital. Com os resultados dessas medições foi possível determinar o Índice de Esbeltez (IdE), calculado pela relação comprimento e espessura das partículas, e a Razão de Planicidade (RP), pela relação largura e espessura. A área superficial das partículas foi calculada pelo método sugerido por Moslemi (1974):

$$a' = \frac{2 \times ((e \times c) + (l \times c) + (e \times l))}{c \times l \times e \times d} \quad (\text{cm}^2/\text{g})$$

SENDO: a' a área superficial em cm^2/g ; e , l e c respectivamente a espessura, largura e comprimento das partículas em cm; e d a massa específica da madeira em g/cm^3

7.2.3. Manufatura dos corpos de prova

O método de produção utilizado foi o de adensamento por vibro-compactação sem prensa sugerido por Parchen (2012). O cimento utilizado neste experimento foi o Portland tipo CP II-Z. Foram utilizadas três relações de mistura de madeira:cimento 1:2,75, 1:2 e 1:1,5 (baseado no peso seco das partículas), de acordo com o delineamento experimental apresentado na tabela 7.2.

TABELA 7.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Tratamento	Relação Madeira:Cimento	Tipo de partícula
T1	1:2,75	P1
T2	1:2	P1
T3	1:1,5	P1
T4	1:2,75	P2
T5	1:2	P2
T6	1:1,5	P2
T7	1:2,75	P3
T8	1:2	P3
T9	1:1,5	P3

FONTE: O autor (2015)

A quantidade de água utilizada nas misturas foi adaptada da fórmula sugerida por Simatupang (1979) com o acréscimo de 15% a mais de água baseado no peso seco do cimento.

$$H_2O = (C \times 0,50) + (M \times (0,3 - TU\%)) \text{ (g)}$$

SEND0: C o peso do cimento (g), M o peso das partículas (g) e TU% o teor de umidade das partículas.

Esta adaptação fez-se necessária devido ao fato de que a metodologia do adensamento por vibro-compactação não envolver pressão, então a umidade presente nas partículas não é extraída fisicamente para ser utilizada como água de reação para a cura do cimento.

Foi diluído na água o aditivo químico Cloreto de cálcio (CaCl_2) em quantidade de 3% em relação ao peso seco do cimento. Os tratamentos foram depositados em moldes prismáticos de madeira compensada com 420 mm de comprimento, 70 mm de largura e 15 mm de espessura. O molde foi posicionados sobre uma mesa vibratória montada com um vibrador Würges com carga de impacto vertical equivalente a 220 N à 3.000 RPM.

Os moldes, totalmente preenchidos com a mistura, foram submetidos à vibração por 30 segundos. Devido ao adensamento, o nível de mistura abaixou e uma nova quantidade de material foi depositada até o limite do molde. A mistura foi novamente submetida à vibração. Este processo foi repetido até não haver mais espaço no molde após os 30 segundos de vibração.

A mistura foi mantida dentro do molde por 7 dias. Após esse período inicial, o molde foi desmontado e os corpos de prova mantidos em ar livre até completar o período total de cura de 28 dias. Os corpos de prova foram então cortados com auxílio de uma serra diamantada.

7.2.4. Determinação das propriedades físicas e mecânicas

a) Absorção de água e Inchamento em espessura

O procedimento adotado para a determinação da absorção de água e inchamento em espessura dos painéis seguiu a norma EN 317 (1993). Foram produzidos 6 corpos de prova com 50 mm de largura e comprimento e 15 mm de espessura para cada tratamento. Os corpos de prova foram então submetidos a imersão em água a 20°C por 2 e 24 horas.

b) Flexão estática

Os corpos de prova foram produzidos nas dimensões de 50 mm de largura, 15 mm de espessura e 350 mm de comprimento para atender as determinações da norma EN 310 (1993).

O módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) foram determinados pela aplicação de uma carga no centro do corpo de prova apoiado em

dois pontos, como ilustrado na figura 7.1. Para cada tratamento foram testados um mínimo de 8 corpos de prova, que atende o requisito mínimo determinado pela norma EN 326-1 (1994).



FIGURA 7.1. ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA
FONTE: O autor (2015)

c) Ligação Interna

O ensaio de ligação interna afere o grau de adesão entre as partículas, em amostras submetidas à esforços de tração perpendicular.

Corpos de prova com uma área superficial de 50 mm^2 foram colados com adesivo tipo PVA em blocos de madeira com área superficial de 75 mm^2 , como ilustrado na figura 7.2, e submetidos ao teste normatizado pela EN 319.

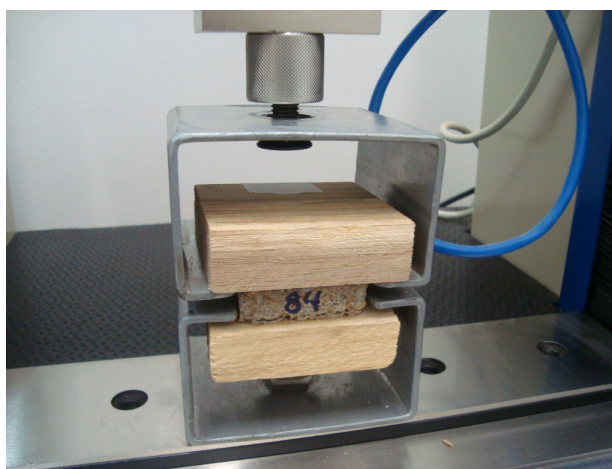


FIGURA 7.2. ENSAIO DE LIGAÇÃO INTERNA
FONTE: O autor (2015)

A ligação interna foi a média aritmética dos resultados de 8 corpos de prova para cada tratamento.

7.2.5 . Análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com arranjo fatorial para os tratamentos visando avaliar a interação entre dois fatores, aditivo químico e espécie utilizada. Para verificar o efeito dos tratamentos sobre as propriedades dos compósitos madeira-cimento, foi realizada uma análise de variância considerando a massa específica uma covariável e na verificação da existência de diferenças estatísticas entre médias, o teste de Tukey foi aplicado, ao nível de probabilidade de 95%. O teste de comparação de médias foi aplicado entre tratamentos, independente do tamanho da partícula ou a relação madeira:cimento utilizada. Todos os testes foram realizados com o auxílio do *software* Statistica 10.

7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.3.1 . Granulometria das partículas

A figura 7.3 apresenta imagens das três classes de partículas da espécie estudada após passagem no moinho de martelo e na peneira automática. Em seguida, é apresentado na tabela 7.3 os valores médios relativos aos dados sobre a geometria das partículas e suas respectivas áreas superficiais.



FIGURA 7.3. COMPARAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE *Swartzia recurva*
FONTE: O autor (2015)

TABELA 7.3. VALORES MÉDIOS DO ÍNDICE DE ESBELTEZ, RAZÃO DE PLANICIDADE E DA ÁREA SUPERFICIAL DAS DIFERENTES GRANULOMETRIAS

Partículas	IdE	RP	AS (cm²/g)
P1	16,26 ^a (54,90)	2,63 ^a (36,30)	76,35 ^a (31,63)
P2	9,41 ^c (60,97)	2,49 ^a (37,23)	45,70 ^b (25,84)
P3	11,94 ^b (68,00)	2,48 ^a (46,64)	40,48 ^c (35,33)

SENDO: IdE, o índice de esbeltez; RP a razão de planicidade; e AS a área superficial; valores dentro de uma mesma coluna acompanhado de letras diferentes indicam diferença estatística apontada pelo teste Tukey a um nível de probabilidade de 95%.

FONTE: O autor (2015)

Não houve diferença estatística entre os valores médios da razão de planicidade, isso indica que as três granulometrias apresentaram espessuras proporcionalmente semelhantes. Porém, a relação entre comprimento e largura foi diferente para cada tratamento. Partículas menores (P1) tenderam a ser mais esbeltas, enquanto que partículas medianas (P2) apresentaram um menor valor de índice de esbeltez, que indica partículas mais curtas.

Os valores médios sobre a área superficial das partículas seguiu o comportamento esperado: partículas menores apresentaram maior área de contato. A diferença estatística entre os resultados justificou a classificação das partículas nestas três determinadas categorias.

7.3.2 . Propriedades físicas

A figura 7.4 apresenta a aparência visual dos corpos de prova produzidos com partículas tipo P1 produzidos com três diferentes quantidades de cimento em relação ao peso seco da madeira.

Granulometria P1

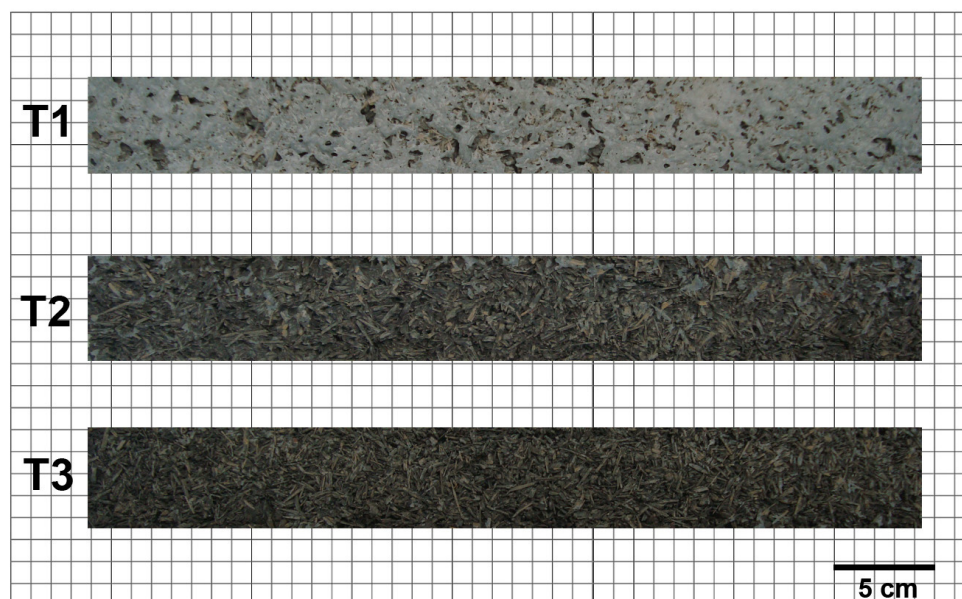


FIGURA 7.4. COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS P1 E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO
FONTE: O autor (2015)

A maior quantidade de cimento nas misturas poderam ser claramente observadas na aparência dos compósito. O tratamento T1, com uma relação madeira:cimento de 1:2,75, apresentou uma superfície com pouca irregularidade e madeira aparente. Após a diminuição da quantidade de cimento para uma relação de 1:2 (T2), a madeira aparente passou a ser bem mais visível, embora há poucos pontos onde poderam-se observar partículas sem revestimento do cimento. No tratamento T3, com a relação madeira:cimento de 1:1,5, a superfície foi quase que completamente formada por madeira e a quantidade de partículas sem revestimento passou a ser mais evidente.

A figura 7.5 apresenta imagens dos compósitos produzidos com partículas P2 de granulometria mediana com diferentes relações madeira:cimento.

Granulometria P2

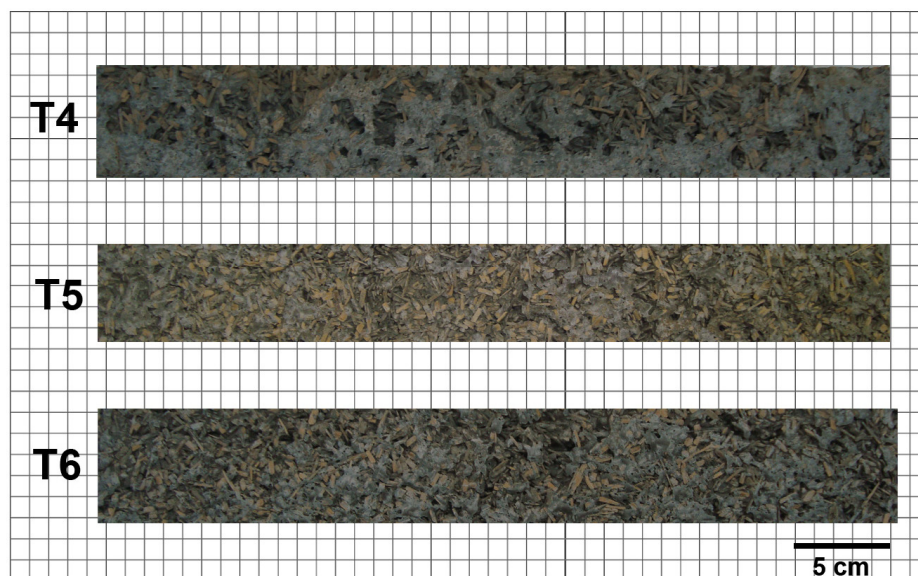


FIGURA 7.5. COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS P2 E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO

FONTE: O autor (2015)

O tratamento T4 apresentou uma superfície mais lisa e que visualmente indica maior quantidade de cimento do que os tratamentos T5 e T6. Entretanto, quando comparado com o tratamento T1, de mesma quantidade de cimento e menor tamanho de partícula, a superfície do tratamento T4 não foi tão regular e apresentou partículas de madeira sem revestimento. Teoricamente, a menor área superficial das partículas P2 deveriam utilizar menos cimento, que resultaria em uma maior quantidade de pasta de cimento puro, que por sua vez deveria fechar a superfície do compósito. Porém, durante a mistura, as partículas de maior área superficial absorveram uma menor quantidade de água e, por isso, a pasta de cimento puro ficou excessivamente líquida. Assim, durante o processo de vibração, houve perda de material cimentício que escorreu pelas fendas dos moldes. Isso pode ser confirmado pela diferença da aparência no sentido vertical do compósito. A região inferior apresentou uma superfície com maior quantidade de cimento do que a região superior.

Entre os tratamentos T5 e T6, a diferença da aparência não foi tão evidente quanto entre os tratamentos T2 e T3. Como houve a perda de material cimentício por excesso de umidade quando a relação madeira:cimento foi de 1:2 (T5), na prática, a mistura colocada nos moldes foi semelhante à mistura com relação de

1:1,5. A quantidade de material orgânico exposto e sem cobertura passou a ser visualmente iguais.

A figura 7.6 apresenta os tratamentos produzidos com partículas do tamanho P3.

Granulometria P3

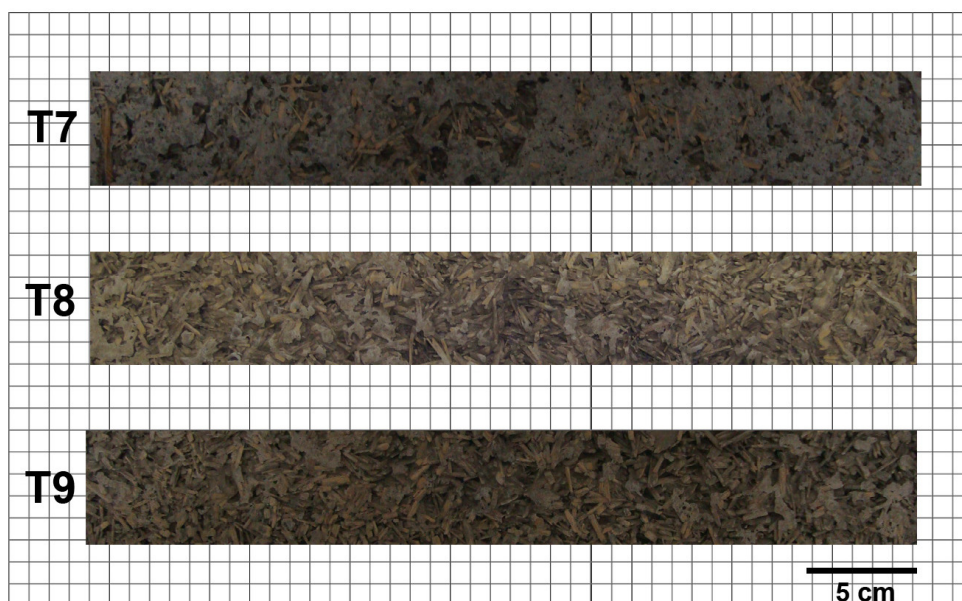


FIGURA 7.6. COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS P3 E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO
FONTE: O autor (2015)

Assim como nos compósitos T4, os corpos de prova produzidos com partículas P3 e com maior quantidade de cimento também perderam material durante o processo de vibração. A superfície do tratamento T7 não foi tão regular quanto a superfície do T1, porém não apresentou a irregularidade no sentido vertical observada no T4. Aparentemente partículas P3, dentro de uma mesma frequência e amplitude de vibração, movimentaram-se menos do que partículas com menores dimensões. Desta maneira, as partículas de madeira foram capazes de reter o assoreamento do material cimentício.

A aparência dos tratamentos T8 e T9 foram semelhantes entre si, assim como foram semelhantes entre os tratamentos T5 e T6. Porém, no caso das partículas P3, a perda de material dos compósitos de relação madeira:cimento de 1:2 não foi tão crítica quanto das partículas P2, assim o tratamento T8 apresentou uma superfície ligeiramente mais regular do que o tratamento T5 ou o tratamento T9.

A tabela 7.4 apresenta os valores médios das propriedades físicas dos compósitos após 28 dias de cura.

TABELA 7.4. PROPRIEDADE FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO

Tratamento	Massa específica (g/cm³)	AA 2h (%)	AA 24h (%)	IE 2h (%)	IE 24h (%)
T1	1,14	16,69	19,43	0,36	0,45
	(4,52)	(6,98)	(5,46)	(52,83)	(27,74)
T2	0,90	22,35	26,24	0,19	0,36
	(4,64)	(9,58)	(8,13)	(32,36)	(44,68)
T3	0,70	37,10	39,56	0,58	0,87
	(5,55)	(6,20)	(9,53)	(30,82)	(14,73)
T4	1,09	14,19	16,62	0,25	0,34
	(4,42)	(9,86)	(8,46)	(50,15)	(36,15)
T5	0,91	23,46	23,44	0,20	0,43
	(5,13)	(14,14)	(4,06)	(53,38)	(45,14)
T6	0,83	22,55	26,22	0,21	0,29
	(3,13)	(7,41)	(5,36)	(70,80)	(37,17)
T7	1,03	14,77	16,97	0,12	0,24
	(7,20)	(10,90)	(11,43)	(57,24)	(54,68)
T8	0,76	20,13	23,29	0,41	0,77
	(11,01)	(15,61)	(11,67)	(53,57)	(27,18)
T9	0,77	19,07	23,79	0,25	0,57
	(8,30)	(7,75)	(7,71)	(64,19)	(44,51)

SEND0: AA, absorção de água após 2 ou 24 horas; e IE, o inchamento em espessura após 2 e 24 horas; Valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

FONTE: O autor (2015)

Os compósitos produzidos com a relação madeira:cimento de 1:2,75 apresentaram valores médios de massa específica acima de 1 g/cm³. Os demais compósitos apresentaram valores médios abaixo deste limite e por isso poderiam ser classificados como compósitos de média massa específica segundo Simatupang (1989).

Todos os compósitos apresentaram valores de inchamento de espessura após 24 horas de imersão em água abaixo do requisito máximo de 1,5% exigido

para painéis comerciais de madeira:cimento produzidos pelo processo *BISON* (NCL INDUSTRIES LTD., 2011). O alto valor de coeficiente de variação desta propriedade foi resultado combinação entre a irregularidade da superfície do corpo de prova e os baixos valores de inchamento, o que dificultou o processo de medição.

A tabela 7.5 apresenta a análise de variância fatorial para as propriedades físicas dos tratamentos, sendo que para as propriedades de absorção de água e inchamento em espessura, a massa específica foi considerada como um fator co-variante.

TABELA 7.5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	P
Massa específica (g/cm³)	Fator A	0,040401	1	0,040401	11,43455	0,001622*
	Fator B	0,034816	1	0,034816	9,85397	0,003180*
	Interação AxB	0,109171	4	0,027293	7,72462	0,000104*
	Resíduos	0,141328	40	0,003533		
AA 2h (%)	Fator A	584,5795	2	292,2897	145,0421	0,000000*
	Fator B	11,7048	2	5,8524	2,9041	0,066724
	Interação AxB	183,2745	4	45,8186	22,7364	0,000000*
	Resíduos	78,5931	39	2,0152		
AA 24h (%)	Fator A	579,5547	2	289,7774	114,4900	0,000000*
	Fator B	41,5326	2	20,7663	8,2047	0,001061*
	Interação AxB	89,0413	4	22,2603	8,7950	0,000037*
	Resíduos	98,7101	39	2,5310		
IE 2h (%)	Fator A	0,213088	2	0,106544	4,739277	0,014536*
	Fator B	0,016102	2	0,008051	0,358122	0,701321
	Interação AxB	0,398743	4	0,099686	4,434214	0,004866*
	Resíduos	0,854280	38	0,022481		

continua

TABELA 7.5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DOS COMPÓSITOS MADEIRA-CIMENTO

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	conclusão
						P
IE 24h (%)	Fator A	0,259337	2	0,129669	4,807757	0,013762*
	Fator B	0,003387	2	0,001694	0,062795	0,939233
	Interação AxB	0,724987	4	0,181247	6,720133	0,000342*
	Resíduos	1,024887	38	0,026971		

SENDO: Fator A - granulometria; Fator B - relação madeira:cimento; * – Significativo ao nível de 95% de probabilidade

FONTE: O autor (2015)

A granulometria, a quantidade de cimento e a interação entre esses fatores influenciaram a massa específica final dos compósitos. Por sua vez, a relação madeira:cimento por si só não afetou significativamente a capacidade de absorção de água após 2 horas de imersão ou o inchamento em espessura. Estas propriedades foram mais influenciadas pelo tamanho das partículas e por suas interações com a quantidade de cimento. Esta informação corrobora com a informação de que o comportamento da pasta de cimento durante o processo de vibração foi diferente de acordo com o tamanho das partículas.

A figura 7.7 apresenta o gráfico com os valores médios da massa específica encontrada para compósitos estudados.

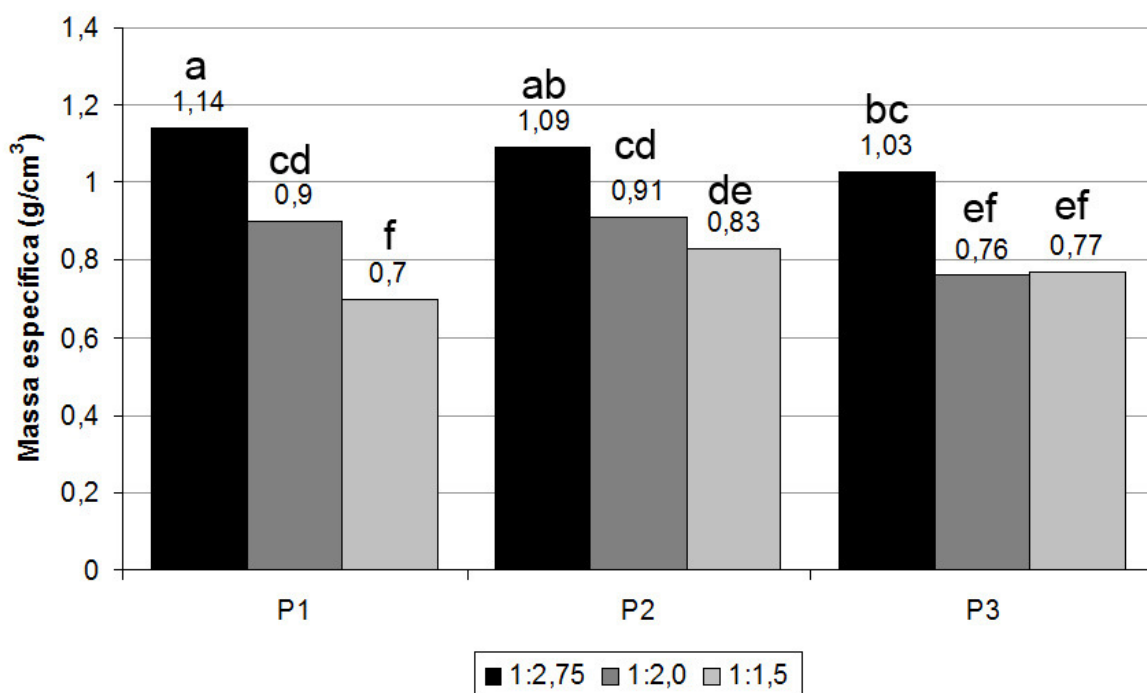


FIGURA 7.7. MASSA ESPECÍFICA DOS COMPÓSITOS PRODUZIDOS COM PARTÍCULAS DE DIFERENTES TAMANHOS E DIFERENTES RELAÇÕES MADEIRA:CIMENTO
 FONTE: O autor (2015)

Para os tratamentos produzidos com partículas P1, o valor médio da massa específica diminuiu de acordo com a menor quantidade de cimento adicionada à mistura. Para os demais tamanhos de partículas, não houve diferença estatística no valor de massa específica quando se utilizava uma relação madeira:cimento de 1:2 ou de 1:1,5.

Dentro das relações madeira:cimento de 1:2,75 e 1:2, compósitos produzidos com partículas P1 apresentaram massa específica estatisticamente superior a daqueles produzidos com partículas P3. Este comportamento não foi observado quando a relação passou a ser 1:1,5. Apenas quando esta relação de quantidades foi utilizada que a massa específica dos compósito produzidos com partículas P2 foi superior ao de partículas P1.

Uma vez que houve diferença estatística entre as massa específicas e esta propriedade influenciou as demais, ela passou a ser considerada uma covariante na determinação do teste de diferença de médias de Tukey. A figura 7.8 apresenta os valores médios para a absorção de água após 2 e 24 horas.

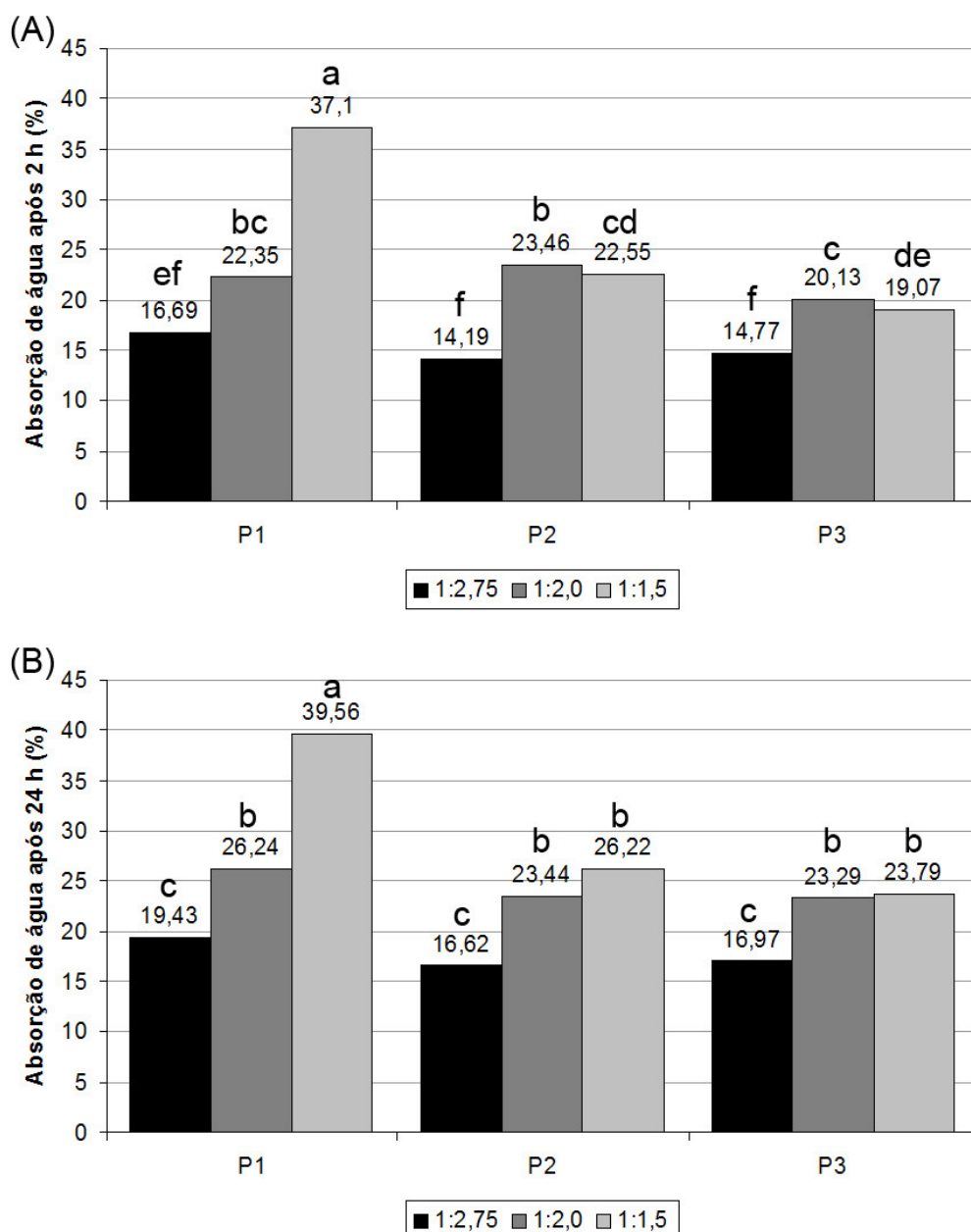


FIGURA 7.8. VALORES MÉDIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA APÓS 2 E 24HORAS DE IMERSÃO
 FONTE: O autor (2015)

Para partículas de granulometria P1, houve diferença estatisticamente significativa para os valores de absorção de água após 2 e 24 horas de imersão entre a relação 1:2,75, 1:2 e 1:1,5. Quanto maior a porcentagem de cimento presente na mistura, menor a absorção de água. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que quanto menor a quantidade de cimento aplicada na mistura, maior é a quantidade de madeira exposta, fator crítico para a absorção de água.

Para as demais granulometrias, este comportamento não se repetiu na totalidade. A absorção de água foi menor para a relação 1:2,75, porém não houve

diferença estatística entre os valores médios para relações 1:2 e 1:1,5 após 24 horas. Após 2 horas, o comportamento foi ainda mais inesperado para maiores granulometrias, apresentado uma porcentagem de absorção maior para a relação 1:2 do que para a 1:1,5.

A correlação entre a propriedade de absorção de água e a quantidade de cimento utilizada na mistura também não é um consenso geral na literatura. Por exemplo, Marzuki *et al.* (2011) analisaram o efeito de diferentes relações madeira:cimento na produção de painéis tradicionais de madeira-cimento com partículas da espécie tropical *Leucaena leucocephala*. Os autores utilizaram partículas semelhantes com a granulometria P1, com a diferença que não houve eliminação dos finos, sendo que 80% das partículas foram retidas entre as peneiras com 2 e 0,5 mm. Para este caso, a absorção de água foi maior no compósitos que utilizaram a proporção de madeira:cimento de 1:2,5 do que aqueles com relação 1:1,75.

Por outro lado, Fuwape *et al.* (1993), ao usarem madeira da espécie tropical *Terminalia superba* de granulometria semelhante à P2 (retida entre peneiras de 6 e 2 mm), observaram uma maior absorção de água após 24 horas de imersão em compósitos produzidos com a relação 1:1,5 do que com a relação 1:2,3. Um comportamento semelhante também foi observado por Ashori *et al.* (2012) ao utilizar madeira de *Populus deltoides*.

Dentro de uma mesma relação de madeira:cimento, o tamanho da partícula não afetou as médias dos tratamentos, a não se quando a relação foi de 1:1,5. Com uma quantidade menor de cimento, compósitos produzidos com partículas P1 apresentaram uma absorção superior aos compósitos que utilizaram partículas maiores em sua composição. A menor granulometria acarretou em uma maior área superficial de madeira que exigiu maior quantidade de cimento para sua total cobertura. Os resultados indicaram, que para a área superficial das partículas P1, a relação de madeira:cimento 1:1,5 não foi o suficiente para proporcionar tal cobertura.

A figura 7.9 apresenta os gráficos com valores médios da propriedade de inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água. Dentro de um mesmo gráfico, colunas acompanhadas de mesma letra indicam semelhança estatística.

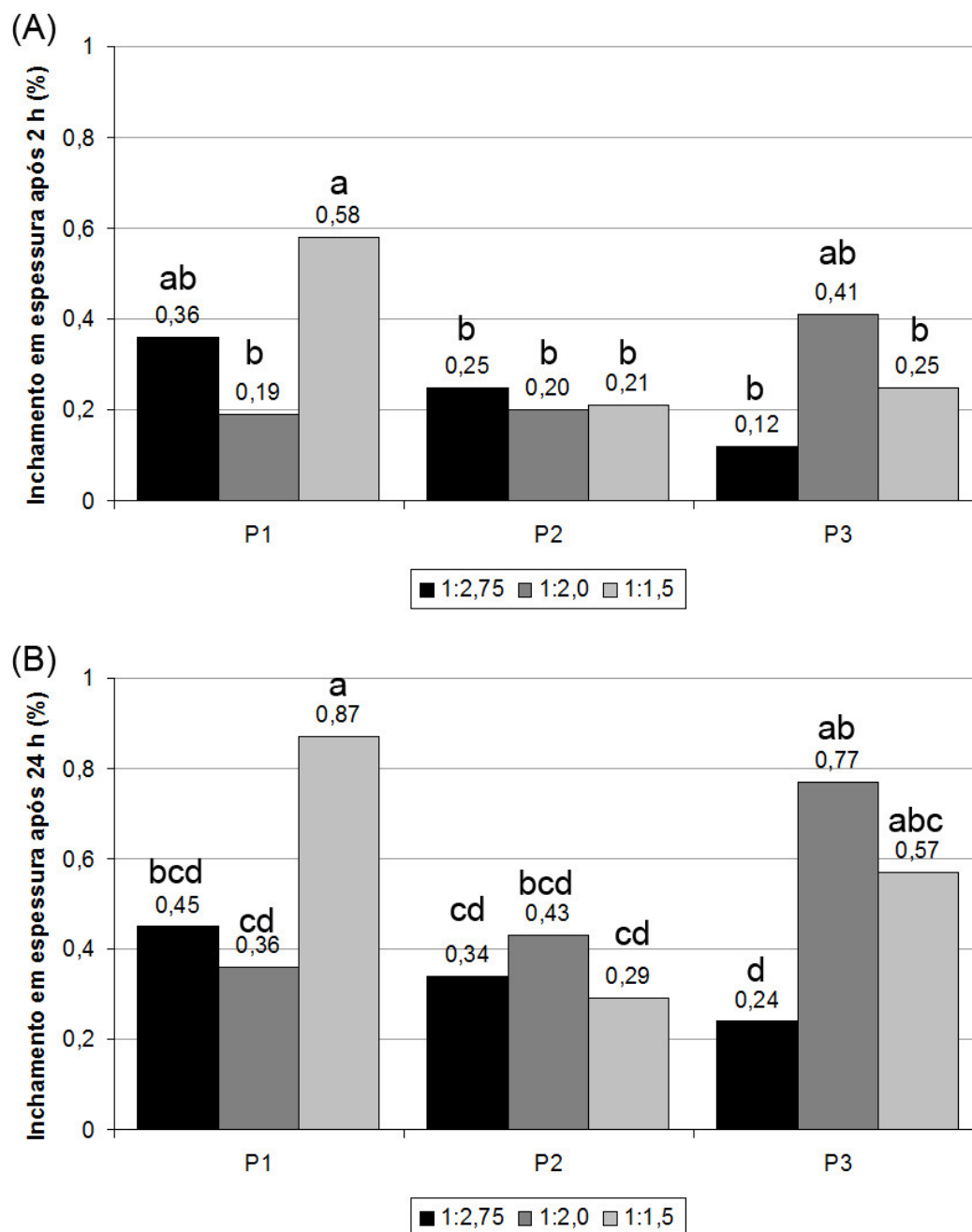


FIGURA 7.9. VALORES MÉDIOS DE INCHAMENTO EM ESPESSURA APÓS 2 E 24HORAS DE IMERSÃO
 FONTE: O autor (2015)

Após 2 horas de imersão em água, pouco pode ser concluído sobre o inchamento em espessura dos compósitos, com exceção da tendência do tratamento produzido com partículas menores (P1) e pouco cimento (relação 1:1,5) apresentar uma média superior do que os tratamentos com mesma relação madeira:cimento e granulometrias diferentes.

O cimento, quando em quantidade suficiente, age como uma limitação física que impede o inchamento higroscópico da madeira. Por isso, quando a relação

madeira:cimento foi de 1:2,75 não houve diferença estatística entre tratamentos de diferentes granulometrias mesmo após 24 horas de imersão. Quando a quantidade de cimento não foi suficiente, relação 1:1,5, o compósito tendeu a ser instável e apresenta maior inchamento em espessura. A baixa quantidade de cimento e o excesso de área superficial das partículas P1 explicam a diferença estatística entre a maioria dos demais tratamentos.

7.3.3. Propriedades mecânicas

A tabela 7.5 apresenta os valores médios para as propriedades mecânicas dos tratamentos estudados neste capítulo.

TABELA 7.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITO MADEIRA-CIMENTO

Tratamento	LI (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
T1	0,60 (22,78)	3,21 (18,86)	2631 (33,02)
T2	0,67 (5,36)	2,19 (19,67)	1477 (49,68)
T3	0,55 (11,52)	1,29 (21,41)	658 (21,09)
T4	0,55 (17,85)	1,73 (38,81)	930 (50,87)
T5	0,64 (14,98)	1,47 (26,97)	813 (35,08)
T6	0,51 (22,12)	1,05 (25,54)	529 (44,16)
T7	0,38 (31,49)	1,53 (37,03)	709 (67,38)
T8	0,25 (38,22)	0,78 (39,22)	248 (43,97)
T9	0,31 (6,82)	0,95 (40,61)	420 (50,81)

Sendo: LI, ligação interna; MOR, módulo de ruptura; MOE, módulo de elasticidade; Valores entre parênteses referente ao coeficiente de variação.

FONTE: O autor (2015)

Considerando que o requisito mínimo para a propriedade de ligação interna sugerido para painéis de madeira-cimento comerciais produzidos pelo processo *BISON* é de 0,4 MPa (NCL INDUSTRIES LTD., 2011), todos compósitos produzidos com partículas P1 (T1 a T3) e P2 (T4 a T6) apresentaram valores médios que atendem a norma. Contudo nenhum dos tratamentos atenderam aos requisitos mínimos *BISON* de 9 MPa para MOR e 3.000 MPa para MOE (NCL INDUSTRIES LTD., 2011)

A análise de variância fatorial dos valores das propriedades mecânicas é apresentada na tabela 7.5.

TABELA 7.5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA FATORIAL EM RAZÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS MADEIRA-CIMENTO

Variável	Fonte	SQ	GL	QM	F	P
LI (MPa)	Fator A	0,299626	2	0,149813	19,57933	0,000001*
	Fator B	0,061232	2	0,030616	4,00123	0,026267*
	Interação AxB	0,144761	4	0,036190	4,72975	0,003298*
	Resíduos	0,298412	39	0,007652		
MOR (MPa)	Fator A	13,68875	2	6,844374	33,37234	0,000000*
	Fator B	0,02043	2	0,010213	0,04980	0,951467
	Interação AxB	0,51320	4	0,128301	0,62558	0,646287
	Resíduos	11,07493	54	0,205091		
MOE (MPa)	Fator A	14547985	2	7273992	28,55461	0,000000*
	Fator B	37738	2	18869	0,07407	0,928700
	Interação AxB	2043965	4	510991	2,00594	0,106682
	Resíduos	13755941	54	254740		

Fator A - granulometria; Fator B - relação madeira:cimento; * – Significativo ao nível de 95% de probabilidade; ns – Não significativo ao nível de 95% de probabilidade
 FONTE: O autor (2015)

A propriedade de ligação interna foi influenciada tanto pela granulometria das partículas e a relação madeira:cimento quanto pela interação entre estes fatores. Por sua vez, as propriedades de flexão estática apresentaram influência significativa apenas do fator granulometria.

A figura 7.10 apresenta o gráfico com a análise de teste de diferença de médias a um grau de probabilidade de 95%. Colunas acompanhadas de letras diferentes indicam que houve diferença estatística entre as médias.

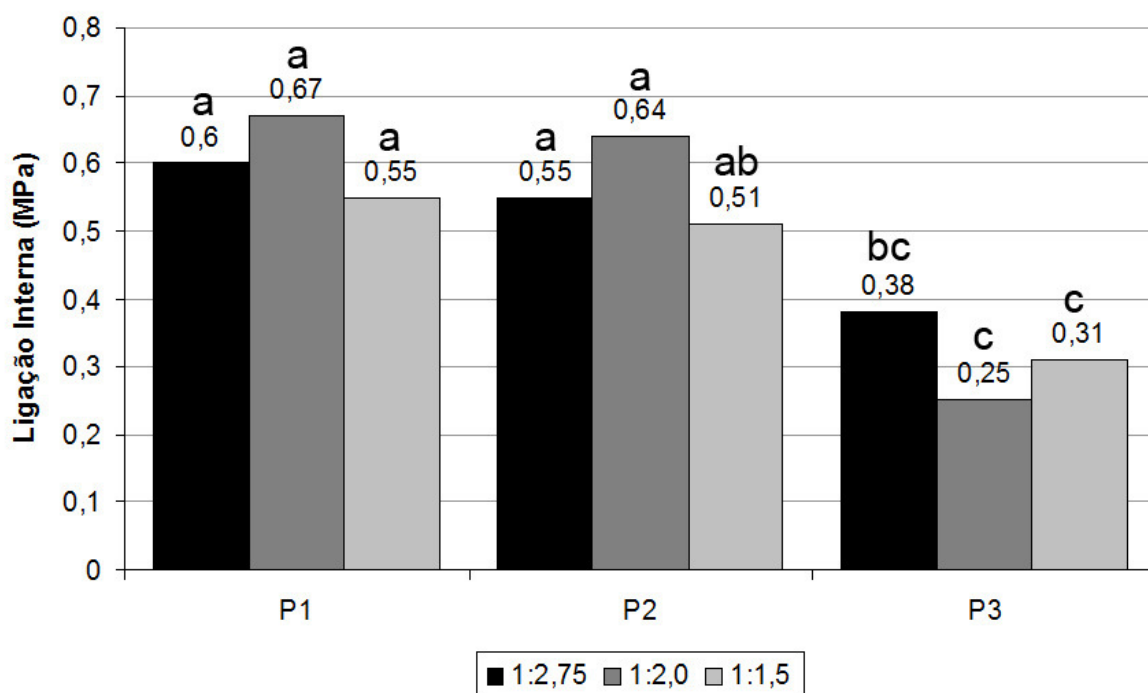


FIGURA 7.10. VALORES MÉDIOS DE LIGAÇÃO INTERNA
FONTE: O autor (2015)

Não houve diferença estatística significativa para os valores médios de ligação interna de compósitos produzidos com partículas do tamanho P1 ou P2 em nenhuma das relações madeira:cimento estudadas. Para estas granulometrias, todos os compósitos atenderam o requisito mínimo de 0,4 MPa exigido para painéis comerciais do tipo *BISON* (NCL INDUSTRIES LTD., 2011) e o requisito de 0,5 MPa exigido pela norma europeia (EN 634-2, 2007). A vibração das partículas de menores dimensões possibilitou uma acomodação que criou um processo físico de ancoragem de tal maneira que o uso de uma menor quantidade de cimento foi o suficiente para realizar a ligação com eficiência.

Contudo, ao se utilizar partículas P3, os valores de ligação interna foram mais baixos em relação às normas. Quando partículas de maior dimensão foram submetidas à vibração, houve pouco espaço para movimentação e, conseqüentemente, acomodação. Um dos reflexos da falta de interação das

partículas foi uma ligação interna mais baixa do que os compósitos produzidos com a mesma relação madeira:cimento, mas com partículas menores.

Dentre compósitos produzidos com partículas do mesmo tamanho, não houve diferença significativa com as diferentes relações madeira:cimento. Uma possível explicação para o fato de que o aumento da quantidade de cimento não alterou os valores médios de ligação interna foi que esta propriedade estaria mais correlacionada com as interações entre partículas de madeira do que com a interação entre madeira e cimento.

O tamanho das partículas no processo de adensamento por vibro-compactação apresentou uma influência distinta da apresentada pela literatura para o processo tradicional de produção com prensa de prato. Nazerian *et al.* (2011) estudaram o efeito de 3 diferentes granulometrias na utilização das espécies *Alnus subcordata* e *Populus deltoides*. Os autores encontraram melhores médias de ligação interna para os compósitos produzidos com partículas semelhantes às partículas P3 (passantes na peneira de 7mm e retidas na de 5mm) do que para compósitos que utilizaram partículas equivalentes ao tamanho P2 ou P1. A justificativa para este comportamento foi a maior área superficial das partículas de menor granulometria. Segundo os autores, dois problemas podem surgir ao usar uma maior área superficial: 1) uma maior superfície de madeira pode aumentar a quantidade de extrativos na solução perniciosos à cura do cimento; 2) uma maior área exige uma maior quantidade de cimento para cobertura.

Segundo o capítulo 3, a espécie *Swartzia recurva* apresentou um índice de inibição moderado após tratamento em água fria (II=24,8). Para este nível, o volume de extrativos pode não ser um fator crítico, assim não chegou a afetar negativamente a propriedade de ligação interna quando partículas P1 e P2 foram usadas.

A figura 7.11 apresenta os valores médios de MOR acompanhado dos resultados para o teste de Tukey. Colunas acompanhadas de mesma letra indicam que não houve diferença estatística entre médias.

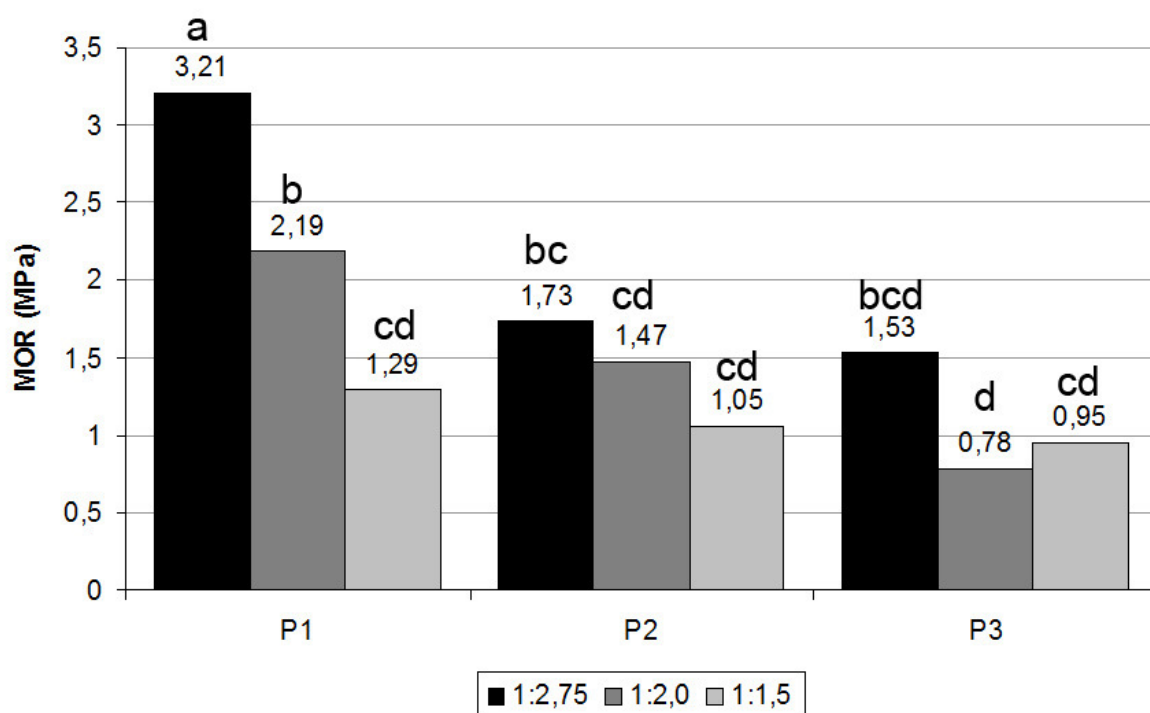


FIGURA 7.11. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE RUPTURA
 FONTE: O autor (2015)

Para as relações de madeira:cimento de 1:2,75 e 1:2, o uso de partículas do tamanho P1 apresentaram valores médios de MOR maiores do que os demais tratamentos. Esta superioridade não aconteceu quando a relação madeira:cimento de 1:1,5. Neste caso não houve diferença estatística entre os valores dos tratamentos produzidos com as três granulometrias.

O melhor resultado para MOR produzidos pelo método de adensamento por vibro-compactação foi para compósitos produzidos com partículas P1 e relação madeira:cimento de 1:2,75. Este resultado foi surpreendente quando comparado com outros citados na literatura para outros produtos madeira-cimento. Papadopoulos *et al* (2006) sugeriram que, na produção de painéis OSB ligados com cimento, uma relação madeira:cimento ótima particularmente para a propriedade MOR deveria ser abaixo de 1:2, chegando a recomendarem até mesmo abaixo de 1:1,5. Ashori *et al* (2012) também recomendaram a relação madeira:cimento de 1:1,5 para alcançar maiores valores médios de MOR em painéis madeira-cimento produzidos tanto com 3% e 7% de adição de CaCl_2 . Este comportamento não foi observado no caso dos compósitos produzidos por vibro-compactação provavelmente devido à influência de um outro fator: a orientação das partículas.

Quando a mistura madeira-cimento é submetida à pressão, as partículas de madeira sofrem uma orientação no sentido da espessura do painel. A madeira orientada apresenta naturalmente melhores valores de MOR do que o material cimentício, sendo assim, compósitos com maior quantidade de madeira tendem a apresentar melhores valores médios para esta propriedade. No caso dos painéis vibrados, não há orientação das partículas em nenhum dos sentidos e a carga máxima que o compósito resiste passa a ser função da quantidade de cimento.

A figura 7.12 apresenta os valores médios da propriedade de MOE para os compósitos estudados neste capítulo. Valores acompanhados de mesma letra indicam semelhança estatística segundo teste de Tukey.

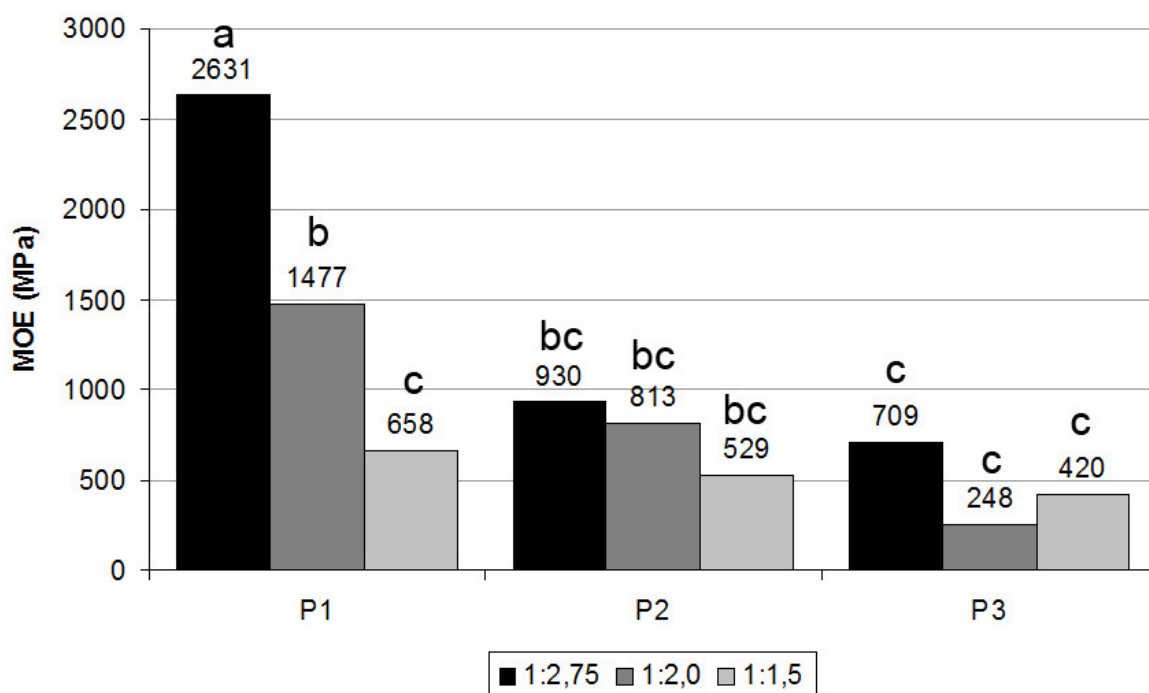


FIGURA 7.12. VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE
FONTE: O autor (2015)

Para as partículas P1, quanto maior a quantidade de cimento, maior foi o valor médio de MOE. Esta correlação foi semelhante a encontrada por Moslemi e Pfister (1987). Uma vez que o MOE indica a rigidez do material, o cimento passa a ser a principal variável do processo. Porém, não houve diferença estatística para os resultados ao se alterar a quantidade de cimento da mistura quando partículas P2 ou P3 foram utilizadas.

A granulometria mostrou-se influente em duas situações. Primeiro, na relação madeira:cimento de 1:2,75, o resultado de MOE do compósito produzido com partículas P1 foi superior aos que usaram partículas maiores. A segunda influência foi na relação 1:2, em que a média do MOE dos compósitos com partículas P3 foi estatisticamente menor do que com partículas P1. Assim, pode-se inferir que para misturas com maior quantidade de cimento, partículas menores tendem a apresentar melhores valores de módulo de elasticidade. Segundo Olorunnisola (2009), um importante parâmetro de controle para as propriedades de compósitos foi o espaçamento entre o material orgânico e o cimento. No processo de vibro-compactação, o uso de partículas menores tende a gerar menos espaços vazios no compósito e, conseqüentemente, maiores valores médios de MOE quando comparados com valores de compósitos produzidos com partículas maiores.

No geral, nenhum tratamento foi capaz de atender ao requisito mínimo de 4.000 MPa para a propriedade de MOE exigidos pela norma européia (EN 634-2, 2007). O tratamento T1, com partículas de granulometria P1 e uma relação madeira:cimento de 1:2,75, foi o que mais se aproximou ao requisito de 3.000 MPa exigido para painéis madeira-cimento comerciais produzidos pelo processo *BISON* (NCL INDUSTRIES LTD., 2011).

7.4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste capítulo, as seguintes conclusões podem ser apresentadas a respeito da relação madeira:cimento e granulometria para produção de compósitos de madeira-cimento pelo método de adensamento por vibro-compactação:

- Partículas retidas entre as peneiras com malha de 2,36 e 1,40mm possuem a granulometria ideal que permite uma melhor vibração e acomodação do material.
- Partículas de maiores dimensões resultam em uma mistura madeira:cimento:água mais líquida. No processo de vibração, misturas excessivamente líquidas vazam pelo molde e comprometem a formação do compósito.
- O controle da quantidade de cimento usado na mistura é uma ferramenta para controle da massa específica do compósito.

- O aumento da quantidade de cimento melhorou as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos

7.5. REFERÊNCIAS

ANGYALOSSY-ALFONSO, V., MILLER, R. B. Wood anatomy of the Brazilian species of *Swartzia* and considerations within the tribe Swartzieae. **IAWA Journal**. v. 23, n.4, p. 359 - 390. 2002

ASHORI, A., TABARSA, T., SEPAHVAND, S. Cement-bonded composite boards made from poplar strands. **Construction and Building Materials**. v.26. p.131-134. 2012

COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS (COPANT). **COPANT 461**. Determinación del peso específico aparente. 1972.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 310**. Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 317**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira – Determinação do inchaço na espessura depois da imersão em água. 1993

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 319**. Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira – determinação da força da tensão perpendicular sobre a superfície plana da placa. 1993

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 326-1**. Wood-based panels – Sampling, cutting and inspection - Part 1: Sampling and cutting of test pieces and expression of test results. 1994.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 634-2**. Cement-

bonded particleboards – Specifications - Part 2: Requirements for OPC bonded particleboards for use in dry, humid and external conditions. 2007.

FRYBORT, S., MAURITZ, R., TEISCHINGER, A., MÜLLER, U. Cement Bonded Composites: A Mechanical Review. **BioResources**. v.3 (n.2) p.602- 626. 2008.

FUWAPE, J. A., OYAGADE, A. O. Bending strength and dimensional stability of tropical wood-cement particleboard. **Bioresource technology**. v. 44. p.77-79. 1993

MARZUKI, A. R., RAHIM, S., HAMIDAH, M. AHMAD RUSLAN, R. Effects of wood:cement ratio on mechanical and physical properties of three-layered cement-bonded particleboards from *Leucaena leucocephala*. **Journal of tropical forest science**. v. 23. n. 1. p. 67-72. 2011

MOSLEMI, A. A. Particle geometry *in*: MOSLEMI, A. A. **Particleboard. Vol.1: Material**. Souther Illinois University. p. 49 - 67. 1974

MOSLEMI, A.A., PFISTER S. C. The influence of cement/wood ratio and type on bending strength and dimensional stability of wood-cement composite panels. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 19, n. 2, p. 165-175 , 1987.

NAZERIAN, M., GHALEHNO, M. D., GOZALI, E. Effects of wood species, particle sizes and dimensions of residue obtained from trimming of wood-cement composites on physical and mechanical properties of cement-bonded particleboard. **Wood Material Science and Engineering**. v. 6. p. 196-206. 2011

NCL INDUSTRIES LTD. **Bison panel - Cement bonded particle board**. Abids, 2011. Catálogo

OLORUNNISOLA, A. O. Effect of husk particle size and calcium chloride on strength and sorption properties of coconut husk-cement composites. **Industrial crops and products**. v. 29. p. 495-501. 2009.

PAPADOPOULOS, A. N., NTALOS, G. A., KAKARAS, I. Mechanical and physical properties of cement-bonded OSB. **Holz als Roh- und Werkstoff**. v. 64. p. 517-518. 2006

PARCHEN, C. F. A. **Compósito madeira cimento de baixa massa específica produzido com compactação vibro dinâmica**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Universidade Federal do Pará, Curitiba, 2012. 172p.

SIMATUPANG, M. H. Mineral-Bonded Wood Composites. *in*: SCHNIEWIND, A. **Concise encyclopedia of wood & wood-based materials**. Pergamon, Oxford. p. 196 - 202. 1989.

STEEGE, H., PITMAN, C. A., PHILLIPS, O. L., CHAVE, J., SABATIER, D., DUQUE, A., MOLINO, J., PRÉVOST, M., SPICHIGER, R., CASTELLANOS, H., HILDEBRAND, P., VÁSQUEZ, R. Continental-scale patterns of canopy tree composition and function across Amazonia. **Nature**. v. 443. p. 444-447. 2006

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Ao considerar os resultados e análises obtidos durante todo o desenvolvimento deste trabalho, pode-se afirmar que:

- A compatibilidade entre madeira e cimento não é diretamente ligada a quantidade de extrativos das espécies selecionadas. É importante se conhecer a composição química do extrativo antes de se determinar a seletividade do material orgânico à cura do cimento.

- Não há uma correlação direta entre os índices tradicionalmente utilizados para se determinar a capacidade inibidora das espécies e as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos produzidos por vibro-compactação após 28 dias de cura.

- É viável a produção de compósitos madeira-cimento com espécies tropicais.

- A massa específica de compósitos produzidos por método de vibro-compactação é diretamente correlacionada com a massa específica básica da madeira utilizada em sua produção.

- O uso do aditivo cloretos não é indispensável para a produção de compósitos para todas as espécies quando o método de vibro-compactação é utilizado.

- Existe uma correlação entre as propriedades mecânicas de compósitos madeira-cimento produzidos pelo método de vibro-compactação com dimensões de painéis e os produzidos com as dimensões dos corpos de prova exigidas pelas normas européias.

- Painéis madeira-cimento vibro-compactados produziram painéis de menor massa específica do que os produzidos por prensa de pratos. Ajustados os valores em relação a diferentes massa específicas, não há diferença entre propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos por metodologias diferentes.

- As propriedades físicas e mecânicas de compósitos produzidos pelo método de vibro-compactação são correlacionadas com a granulometria das partículas de madeira utilizada.

- A escolha da relação madeira:cimento utilizada no processo de vibro-compactação deve ser função da granulometria das partículas.

As conclusões apresentadas ao longo deste trabalho indicam a viabilidade da produção de compósitos madeira-cimento pelo método de adensamento por vibro-compactação utilizando madeiras de espécies tropicais. Considerando a disponibilidade de resíduos das madeiras estudadas em serrarias da região amazônica e o baixo custo de investimento inicial de uma mesa vibratória, a produção deste tipo compósito é uma possibilidade de obtenção de materiais voltados para construção civil de baixo custo para uma população carente da região norte do país. Porém, para que este método de produção possa se tornar uma realidade, recomenda-se novos estudos sobre o método de vibro-compactação e seus produtos, entre eles:

- Estudo detalhado das interações entre partículas de madeira e cimento por sistemas óticos e eletrônicos;
- Determinação de uma fórmula específica da quantidade de água necessária na mistura para o processo de vibro-compactação
- Avaliação de diferentes tipos de cimento Portland
- Avaliar a possibilidade do uso de métodos de aceleração do processo de cura, como uso de CO₂
- Estudos mais detalhados sobre o uso de cal hidratada como possível aditivo para a mistura
- Estudos sobre comportamento térmico e acústico
- Estudo sobre viabilidade econômica do produto;